

**Universidad Carlos III de Madrid**

**Escuela Politécnica Superior**

**Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos  
Área de Ingeniería térmica**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Diseño de un Banco de Ensayos  
de Bombas Manuales**

**Autor: JAIME ARROYO FDEZ-RAÑADA**

**Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO**

**Ingeniería Industrial**

**Madrid 28 de Septiembre de 2006**

**AGRADECIMIENTOS:**

A Karl Erpf porque sin su ayuda todo habría sido más difícil, a Ulpiano por iniciar un proyecto así, al Vicerrectorado de Relaciones Internacionales por hacerlo posible, y por supuesto a mi familia, amigos, Itziar y a todos los que de alguna manera habéis colaborado en este proyecto.

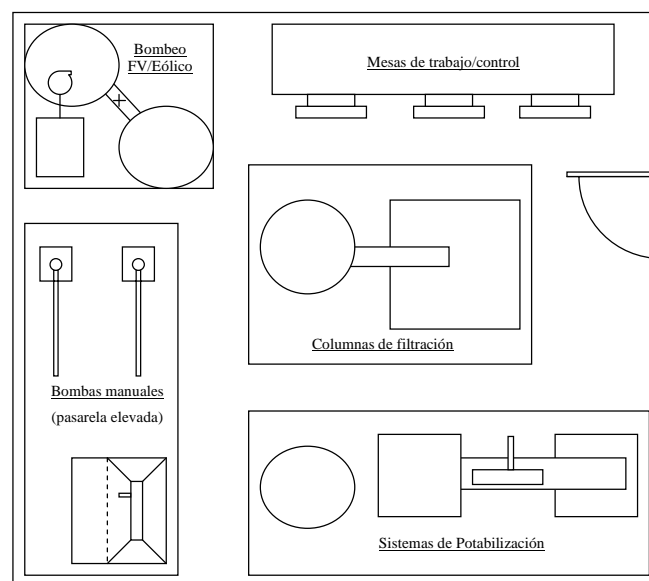
<b>1</b>	<b><i>Introducción</i></b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Abastecimiento de agua y bombeo manual</i></b>	<b>7</b>
2.1	Aguas Subterráneas	8
2.2	Necesidades de Consumo de Agua	12
2.3	Concepto VLOM	14
2.4	Tecnologías para la Captación de Aguas Subterráneas	15
2.4.1	Acceso al agua. Pozos	15
2.4.1.1	Pozos y bombeo manual	16
2.4.2	Tecnologías de bombeo	19
2.4.2.1	Bombas manuales de succión	19
2.4.2.2	Bombas manuales de acción directa	20
2.4.2.3	Bombas manuales de pozo profundo	21
2.4.2.4	Bombas hidroeléctricas	22
2.4.2.5	Bombas con generador diesel	23
2.4.2.6	Bombas con paneles fotovoltaicos	24
2.4.2.7	Bombas eólicas	25
2.4.3	Conclusiones	26
2.5	Esfuerzo Aplicado al Bombeo Manual	27
<b>3</b>	<b><i>Diseño de un Banco de Ensayos de Bombas Manuales</i></b>	<b>30</b>
3.1	Planteamiento Inicial	30
3.2	Selección de Bombas Manuales	31
3.2.1	Bomba manual Malda	34
3.2.1.1	Especificaciones técnicas	35
3.2.1.2	Cálculos previos	44
3.2.2	Bomba manual Afridev	48
3.2.2.1	Especificaciones técnicas	50
3.2.2.2	Cálculos previos	57
3.2.3	Bomba de Mecate	65
3.2.3.1	Especificaciones técnicas	66
3.3	Banco de Ensayos	71
3.3.1	Plataforma	71
3.3.2	Depósitos de agua	74
3.3.2.1	Afridev	75
3.3.2.2	Malda	76
3.3.2.3	Bomba de mecate	76
3.3.2.4	Selección de equipos	76
3.3.3	Sistema de retorno de agua	77
3.3.3.1	Selección de equipos	79
3.3.4	Sistema de simulación de profundidad	79
3.3.4.1	Válvula de seguridad adaptada	80
3.3.4.1.1	Selección y experimentación de equipos	82
3.3.4.1.2	Accesorios	85
3.3.4.2	Sistema de pesas	86
3.3.4.2.1	Selección de equipos	89
3.3.5	Instalación demostrativa	89
3.3.5.1	Selección de equipos	89

<b>3.4</b>	<b>Instrumentación del Banco de Ensayos</b>	<b>90</b>
3.4.1	Caudalímetro	90
3.4.1.1	Selección de equipos	90
3.4.2	Medición del esfuerzo	91
3.4.3	Manómetro	91
3.4.3.1	Selección de equipos	91
3.4.4	Motor eléctrico	92
3.4.5	Tarjeta de adquisición de datos	92
3.4.5.1	Selección de equipos	93
<b>3.5</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>95</b>
<b>4</b>	<b><i>Procedimientos de Evaluación de Bombas Manuales</i></b>	<b>97</b>
<b>4.1</b>	<b>Procedimiento Estándar</b>	<b>97</b>
4.1.1	Obtención de los equipos	97
4.1.2	Inspección previa	98
4.1.3	Medidas y consideraciones previas	98
4.1.4	Caracterización del funcionamiento	99
4.1.5	Experimentación del usuario	100
4.1.6	Test de resistencia	100
4.1.7	Test de abuso	101
4.1.8	Ingeniería	101
4.1.9	Evaluación de la bomba	102
4.1.10	Publicación de resultados	102
<b>4.2</b>	<b>Procedimientos de Evaluación Propios</b>	<b>102</b>
4.2.1	Experimentos previos	102
4.2.2	Caracterización del funcionamiento	103
4.2.3	Experimentación por el usuario	103
4.2.4	Test de resistencia y abuso	104
4.2.5	Ensayos propuestos	104
<b>5</b>	<b><i>Resultados Preliminares</i></b>	<b>105</b>
<b>5.1</b>	<b>Evaluación de la Bomba Manual Afridev</b>	<b>105</b>
5.1.1	Obtención	105
5.1.2	Medidas y consideraciones previas	106
<b>5.2</b>	<b>Evaluación de la Bomba Manual Malda</b>	<b>108</b>
5.2.1	Obtención	108
5.2.2	Medidas y consideraciones previas	109
<b>6</b>	<b><i>Conclusiones y Desarrollo Futuro del Informe</i></b>	<b>110</b>
<b>7</b>	<b><i>Bibliografía</i></b>	<b>113</b>

# 1 Introducción

Este proyecto se enmarca dentro de la iniciativa de la Universidad Carlos III de Madrid para construir un laboratorio de tecnologías apropiadas al abastecimiento de agua. Este laboratorio se ubicará en un espacio habilitado en Escuela Politécnica Superior de la UC3M e incluirá, en una primera etapa, un banco de ensayo de bombas manuales, cuyo diseño se llevará a cabo en este proyecto, un banco de ensayos para sistemas de bombeo alimentados con paneles fotovoltaicos, y un banco de ensayos de sistemas de potabilización, incluyendo columnas de filtración (ver Fig1).

Es intención que el futuro laboratorio sea una plataforma docente para alumnos de ingeniería (principal pero no exclusivamente), de asistencia técnica y formativa para ONG's y cooperantes que podrán familiarizarse con el montaje y operación de equipos específicos y conocer las tecnologías apropiadas como paso previo a proyectos de campo en países en desarrollo, y de I+D para comprender y continuar el intenso desarrollo en el que están envueltas las tecnologías apropiadas en general y las relacionadas con el abastecimiento de agua en particular. Se espera que dentro de laboratorio se puedan realizar ensayos controlados, caracterizar el funcionamiento de los equipos y modelizar los procesos existentes, lo cual permitirá desarrollar proyectos de investigación centrados en la definición de las problemáticas específicas y el desarrollo e implementación de posibles mejoras.



**Fig1. Esquema del futuro laboratorio**

Este tipo de laboratorio, pionero en España tiene su principal precedente en las actividades realizadas durante la década del agua (1980/90). Periodo en el cual se realizó desde la ONU a través de sus distintas agencias y el Banco Mundial un importante esfuerzo de adaptación y desarrollo de tecnologías apropiadas al abastecimiento.

Concretamente, en asociación con el “Consumers’ Association Testing and Research Laboratories” el Banco Mundial desarrolló el proyecto *Laboratory Testing and Technological Development of Rural Water Supply Handpumps (INT/81/026)* durante el cual se ensayaron y se realizó la evaluación de más de 70 modelos de bombas manuales de manera que se consiguiera una idea real de las virtudes y defectos de cada modelo. Del mismo modo el proyecto provocó el desarrollo de nuevas bombas manuales según los conceptos VLOM (enunciados en ese mismo proyecto) para solucionar las carencias de los modelos existentes. Así surgieron bombas como la Afridev y la Tara; nuevas aplicaciones tecnológicas como el uso de plásticos o las bombas de acción directa y sobre todo la creación y normalización de una serie de bombas de dominio público, de libre acceso y fabricación que garantizan la existencia de un modelo fiable y de precio asequible para casi todas las aplicaciones con bomba manual.

Que se sepa, aparte del centro de ensayos del Banco Mundial, sólo existen dos organizaciones que se dediquen al ensayo y evaluación de bombas manuales. La SKAT (Swiss Resource Center and Consultancies for Development), encargada además de la normalización de las bombas de dominio público realiza experimentos y actividades de desarrollo junto a fabricantes y gobiernos en el desarrollo y/o adaptación de bombas de dominio público a las características concretas de una región o país. Por otra parte, la ONG Acción contra el Hambre (Action against Hunger) cuenta con un laboratorio de tecnologías apropiadas en su sede de París aunque no se tienen muchos datos acerca de las actividades realizadas en ese centro.

Según la Rural Water Supply Network (dependiente de la SKAT) el número de personas que se abastecen de agua potable a través de una bomba manual es de 1.000 millones, cifra que por otra parte lejos de disminuir aumenta cada año, sobretodo si se tiene en cuenta que aún hay 1.100 millones de personas (ONU 2000) que carecen de acceso a una fuente de agua segura y de calidad.

Actualmente la bomba manual es un producto altamente desarrollado para su empleo en las condiciones desfavorables de una comunidad en un país en desarrollo. Es decir, la bomba manual esta pensada, y aplica soluciones técnicas avanzadas para poder satisfacer, de la mejor manera posible, las necesidades de abastecimiento de una comunidad en un país subdesarrollado. La práctica totalidad de las bombas presentes en el mercado ha sido desarrollada en las últimas dos décadas, modelos son constantemente revisados y actualizados, incorporando las últimas mejoras disponibles.

Los principios de tecnología apropiada aplicados a una bomba manual indican que el diseño de las mismas no debe estar orientado, en contra de lo que se podría pensar, hacía la durabilidad y la robustez de operación sino hacia un mantenimiento sencillo y un nivel tecnológico de fabricación de componentes y repuestos bajo. Una buena bomba manual se define por la capacidad de la comunidad usuaria para mantenerla en funcionamiento con la mínima intervención de agentes externos y no tanto por su capacidad de bombeo.

Son muchas las organizaciones internacionales de cooperación y ONG's que emplean bombas manuales en sus proyectos de cooperación al desarrollo. En España son múltiples los agentes de desarrollo y ONG's que trabajan con equipos de bombeo manual, y que podrían aprovecharse de la existencia de un laboratorio de este tipo en España. También se espera que una instalación de este tipo sirva para dar a conocer unas tecnologías casi extinguidas en el mundo desarrollado y desconocida para la mayoría.

Sobre este marco, la puesta en marcha de un banco de ensayos permitirá a la comunidad universitaria y a las personas interesadas conocer de primera mano la tecnología de bombeo manual, las soluciones técnicas adoptadas y romper los prejuicios existentes sobre el tema.

Este proyecto recoge y continúa el trabajo realizado por Unai Tomillo en su *“Estudio acerca del empleo de la Bomba Manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo. PFC Universidad Carlos III de Madrid”*, en cuanto que ha proporcionado una fuente de información y una base imprescindible en la situación de la bomba manual en el marco global y de su importancia en los sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo

Dentro de sus limitaciones temporales, este trabajo se centra en el diseño de un banco de ensayos para bombas manuales y el establecimiento de un procedimiento de evaluación de las mismas. Dentro de la documentación del Banco Mundial sobre el laboratorio de bombas manuales no se encuentra mucha información acerca de las soluciones técnicas adoptadas para la instalación de equipos, sistemas de simulación e instrumentación, por lo que en muchos aspectos las decisiones tomadas en el proceso de diseño son innovadoras. Durante el diseño del mismo se ha preferido en muchas ocasiones la sencillez y manejabilidad a la precisión, de manera que cualquier alumno, o persona interesada pueda manipular el sistema sin dificultad, entendiendo porque realiza cada acción y los principios de funcionamiento de la bomba.

Si se ha contado con abundante bibliografía a la hora de elaborar un procedimiento de evaluación de bombas manuales, por lo que la dificultad en este aspecto ha sido adaptar las características de la evaluación a los medios y recursos disponibles.

El presente estudio esta organizado de la siguiente manera.

- En una primera parte se tratara de una manera sencilla y esquemática de situar en contexto la tecnología de bombeo manual. Para ello en un primer lugar se caracterizará la difusión, abundancia y calidad del agua subterránea. En segundo lugar se definirán las necesidades de consumo humano de agua, estableciendo los niveles de servicio óptimo y el rol que juega el bombeo manual en la obtención de un suministro aceptable. Además se analizarán también los aspectos tecnológicos de la captación de aguas subterráneas, se definirá el concepto VLOM y respecto a ese principio se analizarán, brevemente, las distintas opciones disponibles en un proyecto de cooperación de abastecimiento de agua. Para terminar con la primera parte se estudiará, de manera somera, el último elemento de la cadena de bombeo manual, el esfuerzo humano, que será el que determine de manera real la capacidad de bombeo de una bomba manual.

- Tras la primera aproximación se continúa con el diseño, propiamente dicho, del banco de ensayos. Éste se divide en dos partes diferenciadas, la primera relacionada con la selección y caracterización teórica de los modelos que se van a instalar. Paralelamente a esta parte también se gestiona la adquisición por parte de la Universidad de las bombas seleccionadas. Con los datos recogidos en el análisis de las bombas se procedió al diseño de la instalación que iba a albergar las mismas recogiendo información detallada acerca de cada componente y escogiendo el equipo más adecuado para cada necesidad. Por último se procedió a diseñar la instrumentación de las bombas, fundamental para poder monitorizar el funcionamiento del banco de ensayos.

- Los dos últimos capítulos tratan sobre la evaluación de bombas manuales, se establecen procedimientos estándar y propios para el trabajo en el laboratorio. Como la construcción del laboratorio aun esta en preparación los resultados obtenidos son escasos, pero aún así se deja constancia de los pasos que se han podido realizar y la información recabada para cometer los siguientes.

- El presente trabajo concluye finalmente con las conclusiones sobre su utilidad y ámbito y un comentario sobre los trabajos futuros que continuarán con el desarrollo y puesta en marcha del laboratorio de bombas manuales.

Se espera que como resultado último de los trabajos iniciados en este proyecto se ponga en funcionamiento un banco de ensayos de bombas manuales en la Universidad Carlos III de Madrid.



## **2 Abastecimiento de agua y bombeo manual**

El agua es un elemento clave en el desarrollo humano, aquellas zonas que no disponen de una fuente segura de abastecimiento tienen una penalización a la hora de llevar a cabo sus actividades. En los países del conocido como primer mundo el abastecimiento alcanza a prácticamente al 100% de la población, disponiendo de un punto de suministro en el propio domicilio en unas condiciones óptimas, tanto en calidad como en cantidad. En los países en vías de desarrollo la situación es bastante distinta cifrándose en 2100 millones (ONU 2000) la cantidad de personas que no tienen acceso a la cantidad de agua considerada como imprescindible para evitar afecciones en la salud relacionadas con la escasez (50 litros). Y que, dentro de éstas, 1100 millones no tienen acceso a una fuente de agua con las mínimas garantías.

Dotar de un abastecimiento seguro a una población es un proceso largo, costoso y no se puede pretender alcanzar en poco tiempo un nivel de servicio similar al que se tiene en Occidente. Es necesario desarrollar y comprender las estructuras sociales, industriales y económicas de cada región para poder establecer un abastecimiento de agua acorde con el medio, sostenible y aceptado por la comunidad. Normalmente, en los proyectos de cooperación se identifican una serie de pasos, un proceso escalonado para instaurar un abastecimiento de agua a una comunidad que carece de él.

**Escalón 1: Fuente tradicional mejorada.** Se realizan pequeños cambios, tanto en la forma de recolección (cubos, cuerdas,...) como en la educación para la higiene. La inversión inicial es muy baja y se suelen lograr pequeñas mejoras, tanto en el nivel de servicio, que oscila entre 10 y 40 litros por persona día (lpd en adelante) como en la salud pública.

**Escalón 2: Bombeo manual.** Se instala una bomba manual debidamente protegida, se mejora notablemente la calidad del abastecimiento respecto al primer escalón. Sólo es factible en zonas con acuíferos aptos para su explotación. Se consigue un buen acceso al agua (10 – 40 lpd). Los costes iniciales y de operación y mantenimiento (O&M en adelante) son bajos y las tareas de mantenimiento son asumibles por la comunidad. Sigue necesitando del esfuerzo humano para operar. La tasa de éxito de estos proyectos depende en gran medida de la aplicación del concepto y tecnologías VLOM, que se explicarán más adelante.

**Escalón 3 y 4: Fuentes comunitarias, Grifos comunales.** Supone un gran paso respecto a las bombas manuales ya que implica un cambio la fuente de energía (electricidad, diesel, eólica, solar,...) lo que aumenta considerablemente la complejidad del sistema, tanto a nivel tecnológico como organizativo. El nivel de servicio se suele mantener entre 10 – 100 lpd dependiendo de la distancia a la fuente. Los costes iniciales son altos o moderados

excepto en los sistemas por gravedad y la O&M del conjunto requiere buenas capacidades tecnológicas, económicas y organizativas.

**Escalón 5: Conexiones domiciliarias.** Es la situación ideal, requiere de tecnología y gestión compleja, aparte de un acceso seguro a toda una serie de recursos técnicos, humanos, organizativos y financieros. El nivel de servicio suele superar los 100 lpd. Una vez alcanzado este nivel de abastecimiento es importante no concurrir en un despilfarro de los recursos hídricos como sucede en muchas ocasiones.

Estos escalones son tan solo unas directrices. Resulta obvio cual es el objetivo último del abastecimiento de agua, la conexión domiciliaria. Pero para llegar a ese nivel de servicio requiere un trabajo largo y continuado que involucra el desarrollo a todos los niveles de la comunidad (social, económica y administrativamente).

Un abastecimiento de agua defectuoso afecta a la salud y bienestar de las personas que lo padecen, y de igual forma condiciona el posible desarrollo de una agricultura, ganadería o industrias que puedan sostener una economía local saneada.

A la hora de afrontar tanto un proyecto real como un laboratorio de tecnologías apropiadas se deben de tener en cuenta los dos principios fundamentales que debe seguir todo proyecto de abastecimiento (Arlosoloff 1987):

- La tecnología escogida debe dar el mayor nivel de servicio posible a la comunidad dentro de lo que ésta este dispuesta a pagar por ese servicio y dentro de su capacidad para mantener en servicio la tecnología seleccionada.
- El nivel de servicio debe ser sostenible y no sobreexplotar los acuíferos ni el ecosistema.

El abastecimiento de agua es un equilibrio entre las capacidades organizativas y financieras de una comunidad, la tecnología disponible y los recursos hídricos existentes. A continuación se profundiza en distintos apartados en el estudio del abastecimiento de agua y la importancia del bombeo manual:

- Aguas subterráneas: Recurso hídrico preferido en los proyectos de cooperación por sus propiedades
- Necesidades básicas de consumo de agua:
- Concepto VLOM
- Tecnologías para la captación de aguas subterráneas
- Esfuerzo aplicado a la bomba manual

### 2.1 Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas son una de las opciones existentes para el suministro de agua. Presenta una serie de ventajas respecto a otras fuentes (aguas superficiales, agua de lluvia), como el filtrado natural que proporciona la tierra, y su escasa evaporación. Sus inconvenientes radican en la necesidad de elevar el agua (existencia de tecnologías

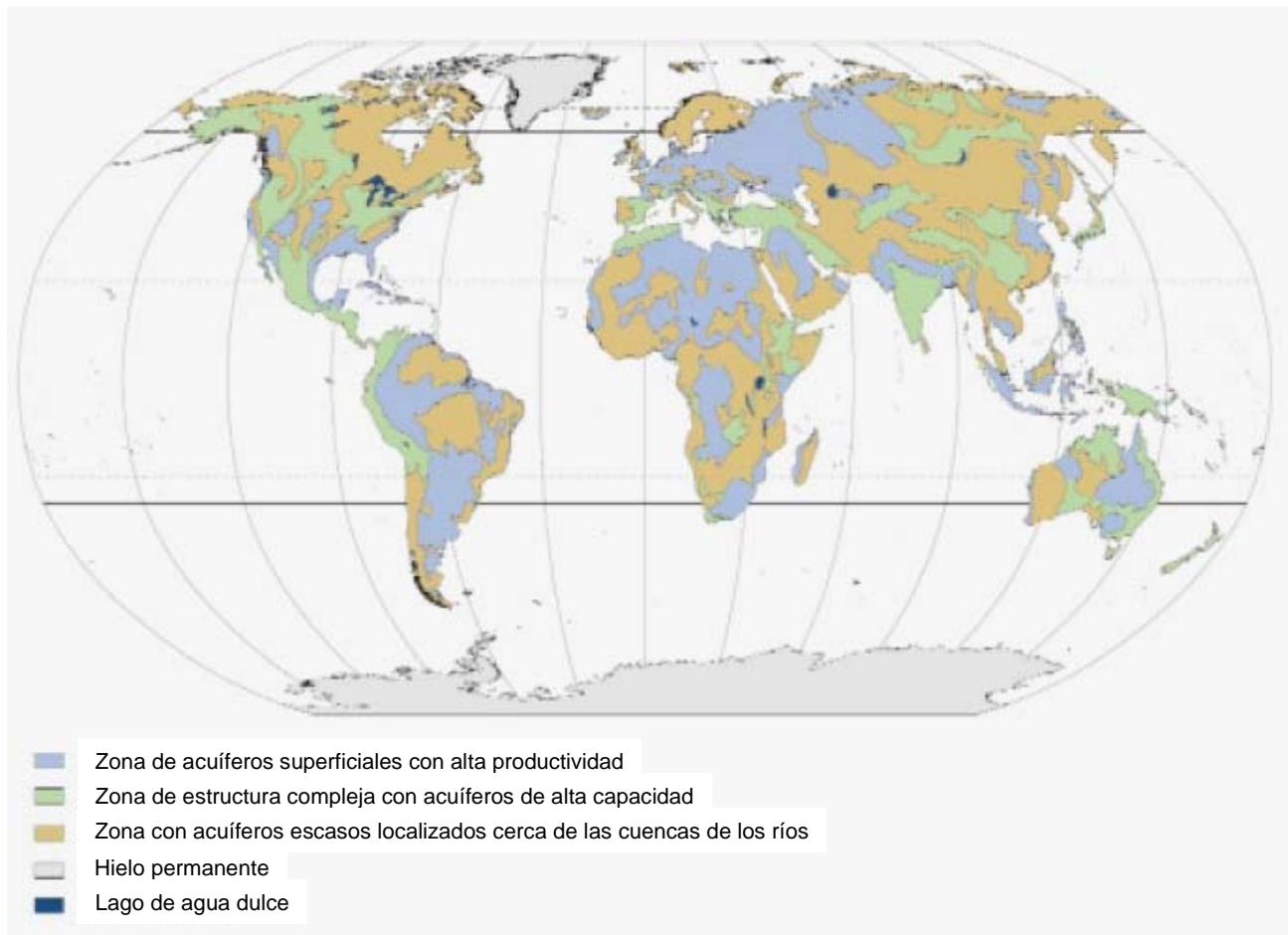
apropiadas), y el desconocimiento generalizado que existe alrededor de las aguas subterráneas. Los expertos encuentran grandes problemas para cuantificar las reservas existentes, la calidad de esta agua y sus mecanismos de regeneración.

Como se aprecia en la tabla mostrada en la Fig.2 alrededor de 2000 millones de personas, un tercio de la población mundial, se abastece de agua para consumo, industria y regadío a través de fuentes subterráneas y extraen entre 600 y 700 km<sup>3</sup> por año, en su mayoría de acuíferos superficiales. (UNEP y otros 2000). Es en las zonas rurales o con baja densidad de población donde la dependencia de las aguas subterráneas es más acusada (Postel 1997, UNEP 1999) por la falta de masa crítica para rusticar una estación potabilizadora de aguas superficiales.

Region	per cent	Population served (millions)
Asia-Pacific	32	1000 – 2000
Europe	75	200 – 500
Central and South America	29	150
USA	51	135
Australia	15	3
Africa	NA	NA
World	-	1500 –2750

**Fig2. Porcentaje del abastecimiento de agua obtenido de las aguas subterráneas  
(UNEP y otros 2000)**

Los acuíferos son estratos geológicos que presentan agua, ya sea en arenas, gravas o fluyendo a través de poros y fracturas de las capas subterráneas. (*Acuífero* en latín significa "contenedor de agua"). Habitualmente, el término acuífero también se utiliza para referirse al agua contenida en cuerpos de agua subterráneos que fluyen lentamente a través del substrato y de los estratos profundos del subsuelo. En la Fig3 se observa como en amplias zonas del planeta existen acuíferos de más o menos fácil acceso, en ocasiones muy alejados de zonas húmedas o con lluvias abundantes. Hoy en día están amenazados por el mal uso que se esta haciendo de ellos, quedando inutilizados en muchos casos por la contaminación del agua o por una sobreexplotación que hace descender drásticamente el nivel freático, incluso hasta agotarse.



**Fig3. Recursos de aguas subterráneas en el planeta (UNEP y otros, 2000)**

Si bien en la mayoría de los casos la propia tierra actúa de filtro natural, las aguas subterráneas no son ajenas a la contaminación (ver Tabla 2.1). Los principales problemas son: las escorrentías de la agricultura que pueden conducir a la contaminación de los acuíferos con nitratos, plaguicidas y bacterias; la salinización de las aguas subterráneas debida al exceso de bombeo se ha identificado como un problema en muchas zonas; el uso de aguas residuales sin tratar para irrigación se ha señalado como una fuente de contaminación por nitratos y bacterias en las aguas subterráneas. Un número incontable de acuíferos han sido contaminados por fuentes puntuales, como sistemas sépticos, fugas en los tanques de almacenamiento subterráneo, derrames o disposición inadecuada de sustancias químicas industriales y filtraciones desde vertederos de residuos sólidos y peligrosos.

**Tabla 2.1.** Problemas relativos a la calidad de las aguas subterráneas (Lawrence y Morris 1998)

Problemas relativos a la calidad de las aguas subterráneas		
Problemas	Causas	Temas de preocupación
Contaminación antropogénica	Protección insuficiente de los acuíferos vulnerables contra los vertidos realizados por seres humanos y aguas de lixiviación provenientes de: <ul style="list-style-type: none"> <li>● actividades urbanas e industriales</li> <li>● intensificación de los cultivos agrícolas</li> </ul>	Patógenos, nitratos, sales de amonio, cloro, sulfatos, boro, metales pesados, COD, hidrocarburos aromáticos y halogenados  nitratos, cloro, plaguicidas
Contaminación que ocurre naturalmente	Relacionada con la evolución del pH-Eh de las aguas subterráneas y la disolución de minerales (aggravada por la contaminación antropogénica y/o la explotación incontrolada)	Principalmente hierro, flúor y a veces, arsénico, yodo, manganeso, aluminio, magnesio, sulfatos, selenio y nitratos (de la paleocarga)
Contaminación en la boca de los pozos	Diseño y construcción inadecuados de pozos que permiten la penetración directa de aguas superficiales o aguas subterráneas poco profundas contaminadas	Principalmente patógenos

Fuente: Foster, Lawrence y Morris 1998.

Al mismo tiempo que se profundiza en el estudio y comprensión de las aguas subterráneas, aumenta la preocupación sobre la calidad del agua potable de dichas fuentes. El tratamiento inadecuado de los residuos ha conducido a incidencias de cólera, amibiasis, hepatitis A, giardiasis y otras enfermedades. Los nitratos son un problema potencial en las aguas subterráneas. Los niveles elevados de éstos en el agua potable (niveles no mayores que 10 mg/litro) pueden causar metahemoglobinemia o el síndrome del “niño azul”. El sistema digestivo de los niños convierte los nitratos en nitritos, que bloquean la capacidad de la sangre del bebé para llevar oxígeno y pueden provocar asfixia y muerte.

En proyectos de cooperación al desarrollo la opción preferida a la hora de establecer un suministro de agua es el acuífero. Frente a las aguas superficiales presenta mejor calidad y no necesita tratamiento salvo en los casos descritos, y frente a las aguas de lluvia representa una fuente segura y constante de abastecimiento. De todas formas desde las distintas experiencias recogidas se aconseja monitorizar la calidad de las aguas periódicamente para evitar problemas de contaminación, que no por poco frecuentes dejen de existir.

Las bombas manuales son especialmente sensibles a una mala explotación de los acuíferos. Por si sola una bomba manual no tiene un efecto significativo sobre el acuífero ya que sus caudales de descarga son bajos. En cambio la instalación incontrolada de bombas hidráulicas eléctricas o diesel, de gran capacidad, ha provocado que los acuíferos no sean capaces de regenerarse produciéndose variaciones en el nivel de la capa freática, e inutilizando en muchos casos pozos contiguos con bombeo manual (Arlosoroff 1987), e incluso llegando a agotar los recursos de agua subterránea de una región. Un ejemplo palpable de este efecto se encuentra en Bangla Desh donde muchas bombas de succión han dejado de ser operativas en la estación seca por culpa de un descenso en la capa freática debido al riego intensivo.

### 2.2 Necesidades de Consumo de Agua

Cada cultura tiene unos hábitos de consumo de agua diferentes y es difícil estimar a nivel mundial una cantidad mínima aceptable de abastecimiento. En los países del primer mundo el consumo de agua per capita, a nivel doméstico, sin contar insumos industriales o de la agricultura supera los 250 litros por persona día. En España por ejemplo, Water Footprint, cifra en 267 el gasto doméstico. Mientras las distintas organizaciones involucradas en proyectos de desarrollo han definido la “necesidad básica de agua” en 50 litros por persona día para beber, cocinar y realizar una higiene (uso doméstico) que evite las afecciones relacionadas con la escasez. En este valor mínimo no se incluyen otros usos necesarios para el desarrollo como son la agricultura, la protección de los ecosistemas o la industria y que elevarían esta cifra a un mínimo de 100 litros por persona día (OMS y UNICEF 2000).

Los usos básicos del agua son un tema aún en discusión, la OMS en 2002 consideraba como imprescindible el agua empleada para consumo directo, preparación de alimentos y en la higiene personal. Sin embargo otros estudios realizados por el Banco Mundial o el departamento estadounidense para el desarrollo consideran el agua empleada en letrinas y cuartos de baño (saneamiento) como imprescindible. El estudio en la década del agua (1980-90) sobre el bombeo manual postulaba como tema a investigar en un futuro la viabilidad de incluir en las instalaciones de bombeo manual riego de pequeños huertos, industrias y otras aplicaciones que sin ser imprescindibles para la vida humana permiten alcanzar un nivel de desarrollo digno.

La calidad de un abastecimiento de agua o nivel de servicio se mide en función de los siguientes parámetros:

- Caudal de agua capaz de suministrar en un tiempo reducido
- Capacidad de bombeo del pozo
- Distancia que la fuente y el consumo
- Disponibilidad o días de funcionamiento al año

En la tabla 2.2, a continuación se muestra los distintos niveles de abastecimiento de agua y sus consecuencias sobre la salud. Destaca en estos datos que igual de importante que proporcionar una fuente segura y abundante de agua es que la misma este situada en un punto cercano a la vivienda o usuario. Son muchos los casos documentados de proyectos que fracasan porque el punto de suministro mejorado esta más alejado que la fuente tradicional y no se consigue que la población cambien sus hábitos de consumo.

**Tabla 2.2.** Nivel de servicio de agua en relación con la accesibilidad, las necesidades atendidas y los efectos en la salud (OMS 2003).

<u>Nivel del servicio</u>	<u>Medición del acceso</u>	<u>Necesidades atendidas</u>	<u>Nivel del efecto en la salud</u>
<b>Sin acceso</b> (cantidad recolectada generalmente menor de 5 l/r/d)	Más de 1.000 m ó 30 minutos de tiempo total de recolección	Consumo Higiene no garantizada (a no ser que se practique en la fuente)	Muy alto
<b>Acceso básico</b> (la cantidad promedio no suele superar los 20l/r/d)	Entre 100 y 1.000 m ó de 5 a 20 minutos de tiempo total de recolección	Consumo El lavado de manos y la higiene básica de la alimentación es posible; es difícil garantizar la lavandería y el baño a no ser que se practique en la fuente	Alto
<b>Acceso intermedio</b> (cantidad promedio de aproximadamente 50 l/r/d)	Agua abastecida a través de un grifo público; o dentro de 100 m ó 5 minutos del tiempo total de recolección)	Consumo La higiene básica personal y de los alimentos está asegurada; se debe asegurar también la lavandería y el baño	Bajo
<b>Acceso óptimo</b> (cantidad promedio de 100 l/r/d y más)	Agua abastecida de manera continua a través de varios grifos o menos de 5 minutos de recolección total	Consumo Se atienden todas las necesidades Higiene	Muy bajo

De acuerdo a los estudios consultados se considera como imprescindible un nivel de servicio superior a 20 litros día recolectados en menos de media hora, aceptable un volumen de 50 litros en cinco minutos y aconsejable un total de 75 litros por persona día recolectados en un tiempo no superior a 5 min (Tomillo 2006). Estando el nivel óptimo en cualquier valor por encima de 100 litros. Las experiencias previas en proyectos con bombas manuales indican que los niveles de servicio obtenidos que oscilan entre los 10 y 40 litros por persona día (Arlosoloff 1987) aunque la capacidad de abastecimiento tomado en los proyectos como valor de diseño oscila entre los 50 y los 75 litros persona día. Valor suficiente para dotar a la instalación del nivel de servicio adecuado independientemente de los hábitos de consumo de la comunidad. Hábitos, que por otra parte, también son parte de los proyectos de abastecimiento en cuando a educación para la higiene.

Normalmente el abastecimiento de agua de una familia lo realizan una o dos personas, tradicionalmente en los países en desarrollo el abastecimiento de agua en una labor de las mujeres y niños, por lo que cada persona debe bombear agua suficiente para toda la unidad familiar (6 personas de media) lo cual elevada el volumen de bombeo a 350 – 600 litros. Por lo tanto una mujer, encargada de suministrar el agua, teniendo en cuenta que una bomba manual tiene una caudales de unos 20 l/min, que esta la bomba esta a 5 minutos de su hogar y que puede acarrear 50 litros por viaje tarda entre 87,5 y 150 minutos en abastecer a su familia de agua (ver tabla 2.3)

$$t_{abastecimiento} = Q_{bomba} \cdot V_{bombeo} + t_{desplazamiento}$$

**Tabla 2.3.** Tiempo estimado de abastecimiento de agua para un ejemplo propuesto

Consumo familiar (litros)	tiempo bombeo (min)	Nº de viajes	Tiempo total (min)
350	17,5	7	87,5
600	30	12	150

En la tabla 2.3 se aprecia claramente la importancia de situar el punto de agua cerca de los puntos de consumo ya que en muchas ocasiones lleva más tiempo transportar el agua que bombearla.

### 2.3 Concepto VLOM

El concepto VLOM (Village Level Operation and Maintenance) significó el desarrollo de la tecnología tradicional de bombeo a tecnología apropiada. Es decir, el concepto VLOM supuso la adaptación o el desarrollo de bombas manuales desde un enfoque técnico del primer mundo a un enfoque técnico de los países empobrecidos. Antes de 1980 casi todas las bombas manuales eran modelos derivados de los modelos existentes a principios del siglo XX y empleados mayoritariamente en los países industrializados. Sin embargo en la actualidad las bombas manuales son fruto de un intenso desarrollo que ha generado una nueva serie de bombas VLOM, “apropiadas” para su empleo en países en desarrollo.

El desarrollo del concepto VLOM fue una de las primeras consecuencias del proyecto “Rural Water Supply, Handpump Project”. La aplicación de tecnologías del primer mundo para resolver los problemas de suministro en el tercer mundo provocó que muchos de los proyectos realizados quedaran abandonados al poco de su inicio por falta de medios para sostener el sistema en funcionamiento. Tanto las tecnologías más modernas como las bombas manuales de los países desarrollados se mostraron en muchas ocasiones ineficaces como solución para la problemática existente en los países en desarrollo, que requería un enfoque específico.

En un principio el concepto VLOM estuvo orientado al desarrollo de una tecnología apropiada según los siguientes principios:

- El mantenimiento se podrá realizar con herramientas comunes, bajo nivel técnico por una persona formada al efecto denominada “village caretaker”
- Las tecnologías escogidas se fabricarán en la medida de lo posible dentro del país de manera que se asegure la accesibilidad a piezas de repuesto
- Se primará la disponibilidad frente a la robustez o durabilidad. Es decir, es mejor un sistema que se estropee cada 6 meses y se pueda reparar en un par de días que un sistema que se estropee cada 12 meses pero que el tiempo de reparación supone más de una semana (ver Fig4).



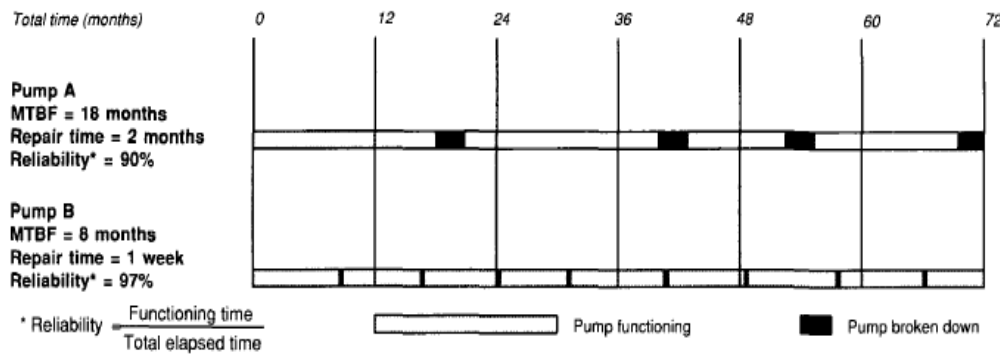


Fig4. Disponibilidad (reliability) frente a durabilidad (Arlosoroff, 1987)

- Bajo coste, tanto inicial como de operación

También se observó que la misma tecnología funcionaba mejor en unos países o regiones que en otras y que los proyectos que tenían éxito compartían que la comunidad beneficiaria era parte activa en el mismo. De esta forma se añadió al concepto VLOM un nuevo enfoque más amplio y no solo basado en la tecnología:

- La comunidad beneficiada será informada e involucrada desde el principio de las diversas opciones disponibles (¿Dónde? ¿Cuándo? ¿Quién?)
- Participará en la medida de sus posibilidades en la financiación del proyecto.
- Se le ofrecerán posibilidades de mayor nivel de servicio pero deberán pagar el sobre coste que esto implica
- La comunidad elegirá el tipo de mantenimiento que desee y quien lo realizará
- La comunidad deberá ser capaz, y pagará todas las reparaciones que hagan falta una vez puesto en marcha el sistema

La aplicación del concepto VLOM produjo un aumento considerable en el éxito de los proyectos de abastecimiento. Se pasó de un 25 – 50% de equipos operativos a un mismo tiempo en la década de los 70 a alcanzarse un 80 – 90% en proyectos VLOM durante la década del agua (1980-90).

## 2.4 Tecnologías para la Captación de Aguas Subterráneas

Como ya se ha venido nombrando hay distintas opciones tecnológicas que pueden cumplir los principios VLOM, en este punto se va a describir cada una de ellas, su potencial y capacidad como solución al problema del abastecimiento.

### 2.4.1 Acceso al agua. Pozos

Tan importante como la tecnología de bombeo empleada es la construcción de un pozo que permita la accesibilidad al agua. Los conceptos VLOM también se han extendido a la perforación y excavación de pozos. Desgraciadamente esta fuera del alcance del proyecto un estudio detallado de las distintas tecnologías implicadas. Tan solo apuntar que la

posibilidad, o elección de un tipo de pozo u otro condiciona tanto los costes del proyecto, como las tecnologías de bombeo aplicable, e incluso la contaminación o no del acuífero. En la tabla 2.4. se ofrecen unos datos estimativos acerca de los costes y capacidades técnicas de cada tipo de pozo

**Tabla 2.4.** Tecnologías de construcción de pozos (UNICEF 1999).

	Cavado manual	Perforación manual	Equipo de perforación con cable	Perforadora rotativa pequeña	Perforadora rotativa de usos múltiples
Gastos de inversión aproximados en dólares estadounidenses	\$1.000	\$1.000-5.000	\$20.000-100.000	\$100.000-250.000	\$200.000-500.000
Costo de operación	muy bajo	bajo	bajo	mediano	muy elevado
Capacitación operativa	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Aptitudes para las reparaciones	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Respaldo complementario	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Tasas aproximadas de penetración en metros por cada día de 8 horas de trabajo	0,1-2,0m	1-15m	1-15m	20-100m	20-100m
Pozos de 200 mm* de diámetro a 15m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	veloz	veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro a 50m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	lento y difícil	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones semi consolidadas	-	imposible	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 100 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones consolidadas (duras, no las de grava apisonada)	-	imposible	muy lento	muy veloz**	muy veloz**
* pozos de 200 mm para construir un pozo de 100 mm de diámetro tras la instalación de filtros el apisonamiento de la grava. ** supeditado al apoyo logístico					
De: Arlosoroff, S., et al, Community Water Supply, The Handbomba Option, PNUD/Banco Mundial					

### 2.4.1.1 Pozos y bombeo manual

La elección de un tipo de pozo u otro depende del tipo de terreno, de la profundidad de la capa freática y de los medios técnicos disponibles. Según el concepto VLOM siempre se deberá buscar la opción que implique en mayor medida a la comunidad pero sin que esto perjudique el funcionamiento global de la instalación. Un pozo cavado a mano puede ser fácilmente construido con un pequeño entrenamiento por la población local mientras que para manejar una perforadora rotativa hace falta personal experimentado, y grandes recursos logísticos. Es habitual en los países en desarrollo que las perforadoras infratilizadas por la falta de repuestos y combustible o por la ausencia de mano de obra capaz de manejar los equipos.

Para el bombeo manual se puede usar indistintamente un tipo de pozo u otro con escasas modificaciones. En la Fig5 y Fig6 se ven las partes principales del pozo y las distintas técnicas de construcción de pozos.

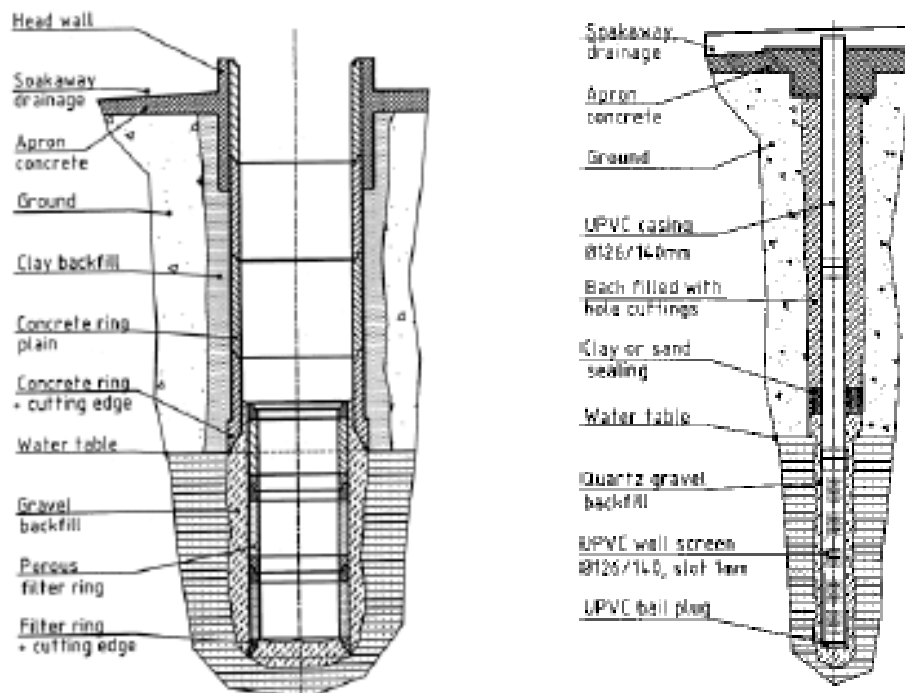


Fig5. Pozo excavado / Pozo perforado (Baumann, 2000)



Fig6. Distintas técnicas de construcción de pozos (Baumann, 2000)

Un aspecto fundamental en el diseño de un pozo y la posterior instalación de una bomba manual para su aprovechamiento es la profundidad a la que debe situarse el pistón respecto al nivel de agua. Este parámetro depende del tipo de pozo, del terreno, y de la bomba empleada. Como se observa en la Fig7 se definen dos niveles de agua, el nivel estático (Static Water Level) que es el nivel de la capa freática en la estación seca y el nivel dinámico de agua (Dinamic Water Level) que sirve para contabilizar el descenso de nivel al producirse bombeo. El valor del DWL, también conocido por PWL (Pumping Water Level) oscila según la permeabilidad del terreno, el tipo de pozo en el que nos encontremos y el caudal bombeado. También se conoce como factor de recarga.

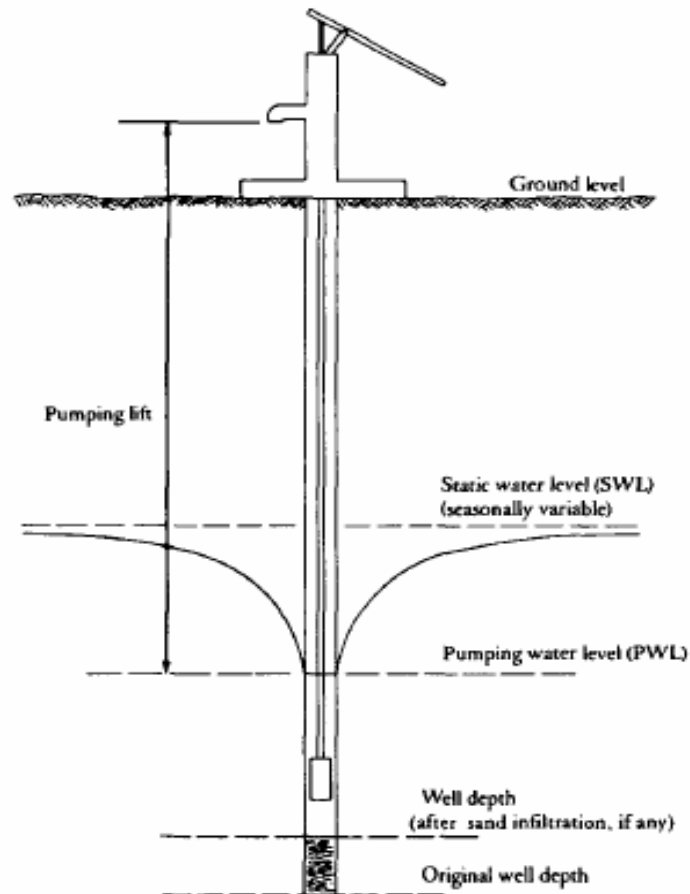


Fig7. Niveles de agua subterránea (Reynolds, 1992)

Es difícil encontrar documentación que aconseje una diferencia mínima entre la posición del pistón y el DWL o el SWL. Generalmente se recomienda dejar la mayor profundidad posible. A modo orientativo se puede aventurar que la diferencia no debe ser menor a un metro respecto al DWL en pozos excavados, y superior a 5 – 6 metros en caso de pozos perforados si la permeabilidad del terreno es alta.

## 2.4.2 Tecnologías de bombeo

### 2.4.2.1 Bombas manuales de succión

#### Descripción:

Las bombas de succión tienen el cilindro en el cuerpo de la bomba, el agua es succionada por la depresión creada por el pistón (Fig8). En teoría la profundidad máxima de bombeo son 10m, pero a efecto prácticos es muy difícil conseguir bombeo a profundidades superiores a 7m

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	60 – 80 mm
Carrera:	400 mm
Caudal aprox:	30 – 60 l/min
Profundidad:	0 – 7 m
Descarga diaria:	1 – 3 m <sup>3</sup>
Población (por ud.):	70 – 100 pers.
Nivel de servicio:	10 – 50 lpd
Tipo de pozo:	Excavado ó perforado

#### Materiales:

Cuerpo de la bomba:	Acero
Tubería:	PVC
Válvulas:	Latón

#### Producción:

Las bombas de succión no requieren de grandes capacidad técnicas para su fabricación. Se pueden producir fácilmente en países en desarrollo.

#### Instalación:

Las bombas de succión resultan fáciles de instalar, no requieren herramientas especiales

#### Mantenimiento:

Este tipo de bombas tiene un potencial excelente para su mantenimiento a nivel local, VLOM. Necesita de herramientas sencillas y habilidades básicas.

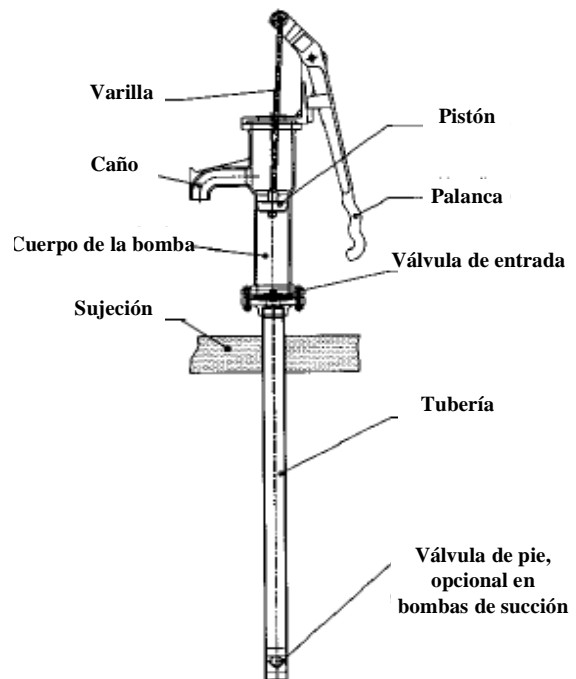


Fig8. Bomba de succión No. 6  
(Baumann 2000)

#### Observaciones:

La profundidad máxima de bombeo esta limitada a 7 m.

Por su bajo precio y bajo mantenimiento se suele recomendar para pequeños grupos de usuarios, familias, con no más de 50 – 70 usuarios por bomba. Su diseño no suele resistir un empleo intensivo propio de comunidades de mayor tamaño.

Gozan de gran popularidad entre los usuarios.

Requieren cebado. Si la válvula tiene perdidas y entra aire en el sistema hay que cebar la bomba para poder usarlo, esto puede provocar la contaminación.

### 2.4.2.2 Bombas manuales de acción directa

#### Descripción:

Las bombas de acción directa basan su funcionamiento en una varilla hueca unida a un pistón, directamente accionada por el usuario (Fig.9). El cuerpo de la bomba suele estar hecha de acero y la varilla de plástico. Estas bombas son resistentes a la corrosión.

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	50 – 53.4 mm
Carrera:	400 mm
Caudal aprox:	30 – 60 l/min
Profundidad:	2 – 15 m
Descarga diaria:	1 – 5 m <sup>3</sup>
Población max.:	300 pers. (por ud)
Tipo de pozo:	Excavado ó perforado

#### Materiales:

Cuerpo de la bomba:	Acero galvanizado
Palanca, accionador:	Acero inox.
Tubería, varilla:	HDPE/PVC
Válvulas:	Plástico

#### Producción:

Las bombas de acción directa han sido especialmente concebidas para su fabricación en países en desarrollo.

#### Instalación:

La instalación es sencilla y no requiere de herramientas especiales. Todos los componentes pueden ensamblarse antes de su montaje.

#### Mantenimiento:

Este tipo de bombas tiene un potencial excelente para su mantenimiento a nivel local, VLOM. Necesita de herramientas sencillas y habilidades básicas. Es frecuente encontrarlas en las poblaciones rurales.

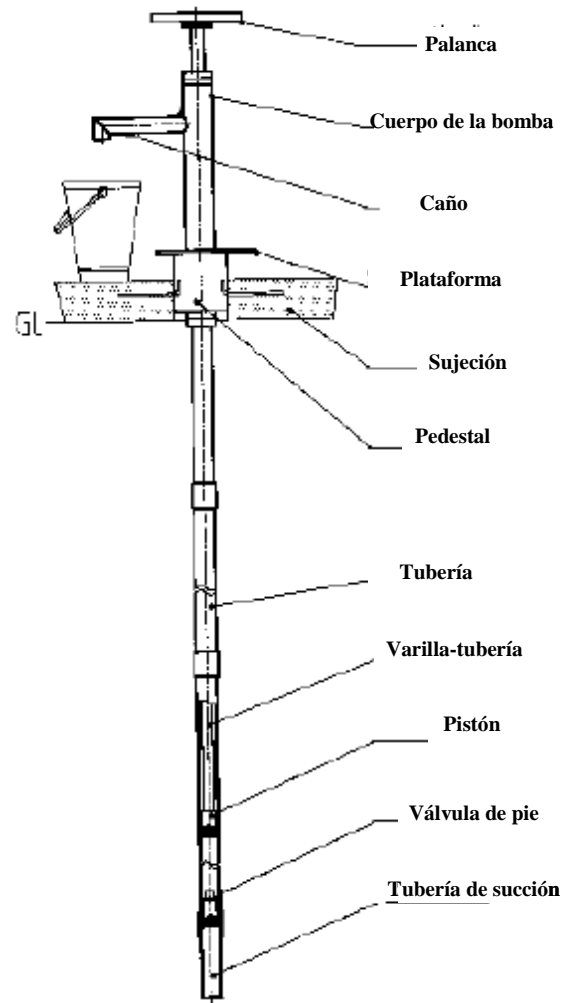


Fig9. Bomba de acción directa  
(Baumann, 2000)

#### Observaciones:

La profundidad máxima de bombeo es de 15 metros pero no está recomendado su uso para profundidades superiores a 12 metros.

Existen diseños aptos para su empleo familiar (50 – 70 usuarios) y para su empleo comunitario (hasta 300 usuarios).

El diseño de estas bombas ha estado propiciado por los problemas que presenta la bomba de succión (profundidad de bombeo, necesidad de cebado, durabilidad).

### 2.4.2.3 Bombas manuales de pozo profundo

#### Descripción:

Las bombas de pozo profundo son, en su mayoría bombas accionadas con palanca (Fig10) aunque también existen de rueda y de pie. Pueden tener el cilindro accesible directamente o no dependiendo de los diámetros empleados. En este tipo de bomba los requerimientos de material son más exigentes

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	50 – 63.4 mm
Carrera:	125 – 250 mm
Caudal aprox:	10 – 40 l/min
Profundidad:	10 – 80 (100) m
Descarga diaria:	1 – 5 m <sup>3</sup>
Población (por ud.):	300 pers.
Tipo de pozo:	Excavado ó perforado

#### Materiales:

Cuerpo de la bomba:	Acero galvanizado
Palanca, accionador:	Acero galvanizado
Tubería:	Acero, acero inox, plástico
Válvulas:	Latón, plástico

#### Producción:

Suelen requerir una buena base industrial y un mercado amplio para justificar su fabricación en un país. India y algunos países africanos tienen esta industria establecida

#### Instalación:

Depende del diseño, puede requerir herramientas especiales. Los nuevos diseños han simplificado la instalación, posible con poco entrenamiento y herramientas sencillas. En cambio otros modelos requieren costosos equipos y grupos de trabajo especializados



#### Mantenimiento:

Los nuevos diseños tienen un buen potencial VLOM, siendo de fácil reparación y mantenimiento con pocas herramientas. Gozan de buen nivel de aceptación

#### Observaciones:

Si se emplea acero galvanizado no son resistentes a la corrosión por lo que se necesita el uso de otros materiales.

Para instalaciones en pozo abierto y/o muy profundas es necesario un sistema auxiliar de sujeción.

### 2.4.2.4 Bombas hidroeléctricas

#### Descripción:

Cuando la extensión de la red eléctrica de un país lo permite, las bombas hidroeléctricas presentan unas condiciones favorables para su instalación en comunidades medianas o grandes. El caudal es función del diámetro de la tubería instalada. El sistema de tarificación también suele ser favorable a estos sistemas. Requieren de un tanque de almacenamiento para atender a los picos de demanda y a las faltas de suministro eléctrico. También puede llevar asociada la instalación de una red de abastecimiento

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	140 – 150 mm
Profundidad:	hasta 300 metros
Descarga diaria:	1 – 25 m <sup>3</sup>
Potencia:	1 – 20 kW
Depósito de agua:	30-40% de la descarga diaria
Población (por ud.):	1000 - 5000 pers.

#### Características:

Es aconsejable una red de distribución, ya sean grifos comunales o conexiones domiciliarias. Proporciona un buen nivel de abastecimiento.

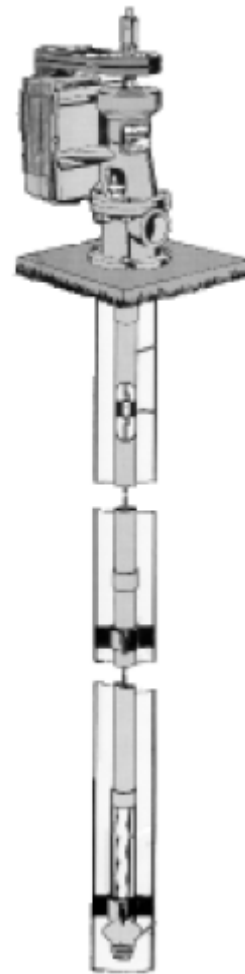
#### Construcción:

La construcción de la red de distribución permite implicar a toda la comunidad. Para la bomba hace falta personal especializado.

#### Operación y mantenimiento:

Las bombas eléctricas sumergibles requieren muy poco mantenimiento. Sí existen problemas con las fluctuaciones de corriente en la línea pudiendo dañar los equipos.

En caso de avería la comunidad no puede arreglar la bomba por si misma



**Fig11. Bomba hidroeléctrica**  
(Baumann, 2000)

#### Coste:

Los costes son función de la distancia a la línea, el tamaño de la red de distribución y el tipo de depósito instalado. Por norma general los costes oscilan entre \$40.000 y \$70.000.

Los costes de O&M varían entre \$0,80 y \$1,5 por persona año. Valor comparable al de bombeo solar.

#### Observaciones:

La instalación de este tipo de sistemas sólo está justificada cuando la comunidad receptora cumple los requisitos organizativos, económicos y un estudio demuestra que el acuífero tiene capacidad suficiente



### 2.4.2.5 Bombas con generador diesel

#### Descripción:

Este tipo de sistemas consisten en el típico generador diesel acoplado a un alternador para alimentar una bomba hidroeléctrica o directamente a una bomba de tipo mecánico. Los costes del motor, el generador y la bomba son aceptables. El problema esta en el precio y disponibilidad del combustible. Además estos motores requieren bastante mantenimiento y piezas de repuesto. Suele ir acompañada de un almacenamiento intermedio y una red de distribución.

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	120 – 150 mm
Profundidad:	hasta 300 metros
Descarga diaria:	1 – 25 m <sup>3</sup>
Potencia:	1 – 20 kW
Depósito de agua:	30-40% de la descarga diaria
Población (por ud.):	1000 - 5000 pers.
Viviendas:	100 - 500

#### Características:

Es aconsejable una red de distribución, ya sean grifos comunales o conexiones domiciliarias. Proporciona un buen nivel de abastecimiento.

#### Construcción:

La construcción de la red de distribución permite implicar a toda la comunidad. Para la bomba hace falta personal especializado.

#### Operación y mantenimiento:

Requieren de la atención constante de un operario, un mantenimiento continuo y un fácil y seguro acceso a repuestos y combustible.

En caso de avería la comunidad no puede arreglar la bomba por si misma

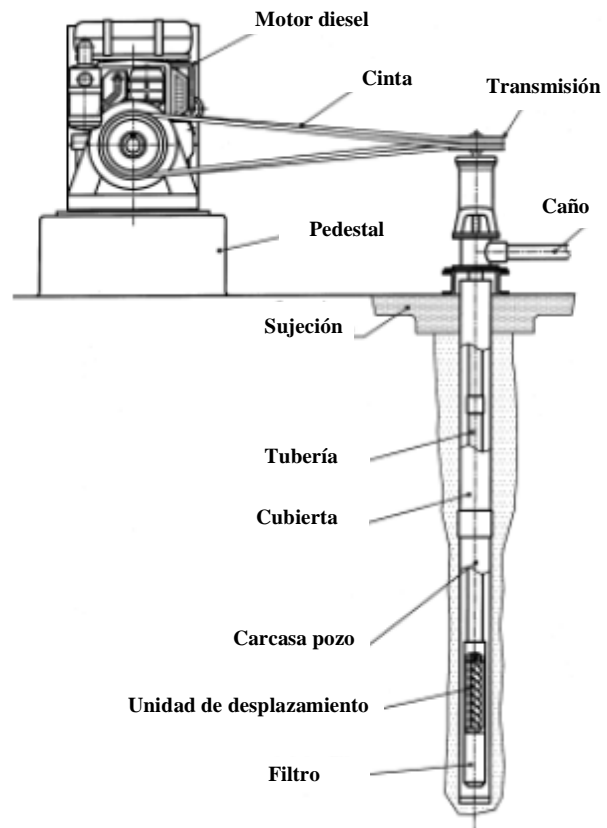


Fig12. Bomba diesel (Baumann, 2000)

#### Coste:

Los costes son función del tamaño de la red de distribución y el tipo de depósito instalado. Por norma general los costes oscilan entre \$40.000 y \$70.000.

Los costes de O&M varían entre \$0,50 y \$2,50 por persona año. Valor un 25% superior al de bombeo solar.

#### Observaciones:

La instalación de este tipo de sistemas sólo esta justificada cuando la comunidad receptora cumple los requisitos organizativos, económicos y un estudio demuestra que el acuífero tiene capacidad suficiente.

### 2.4.2.6 Bombas con paneles fotovoltaicos

#### Descripción:

Existen dos tipos de bombas solares fotovoltaicas. El primero, mediante un inversor funciona con una bomba AC hidroeléctrica sumergida, el segundo opera directamente con una bomba DC. La bomba funciona automáticamente cada vez que el sol lo permite. El mantenimiento es prácticamente nulo. Requieren de un depósito intermedio y es aconsejable la instalación de una red de distribución.

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	100 – 150 mm
Profundidad:	hasta 120 metros
Descarga diaria:	1 – 15 m <sup>3</sup>
Potencia:	4.5 – 5.5 (kW/m <sup>2</sup> /d)
Depósito de agua:	50-70% de la descarga diaria
Población (por ud.):	500 - 2000 pers.

#### Características:

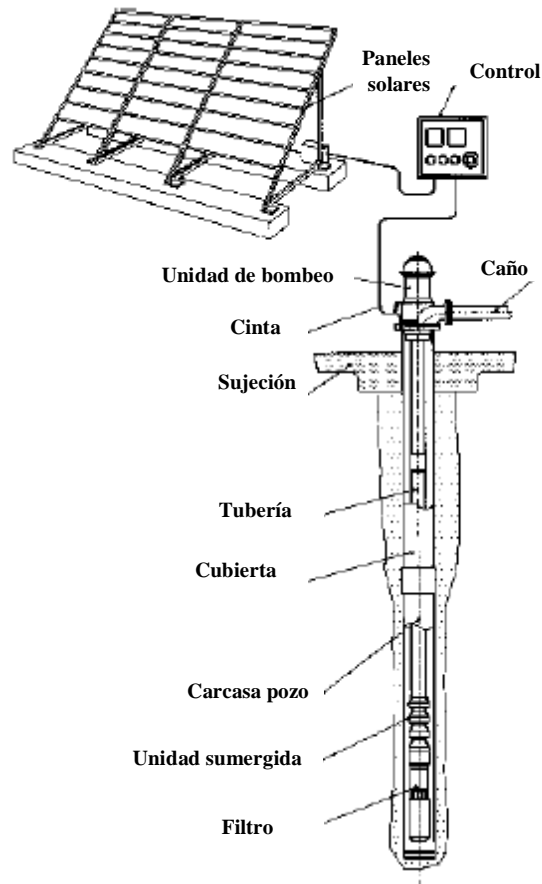
Es aconsejable una red de distribución, ya sean grifos comunales o conexiones domiciliarias. Proporciona un buen nivel de abastecimiento. La experiencia de campo y el aumento de coste, la hace desaconsejable para profundidades mayores de 35 metros

#### Construcción:

La construcción de la red de distribución permite implicar a toda la comunidad. Para la bomba hace falta personal especializado.

#### Operación y mantenimiento:

Necesitan poco mantenimiento y ningún repuesto. Una sola persona bien entrenada es suficiente para llevar a cabo la operación y mantenimiento del sistema. Necesita apoyo de técnicos especializados del primer mundo para reparar o reponer los equipos averiados.



#### Coste:

Los costes son función del tamaño de la red de distribución, la profundidad de bombeo y el tipo de depósito instalado. Por norma general los costes oscilan entre \$35.000 y \$70.000. El alto coste de los paneles es un factor crítico

Los costes de O&M varían entre \$0,80 y \$1,50 por persona año.

#### Observaciones:

La instalación de este tipo de sistemas sólo está justificada cuando la comunidad receptora cumple los requisitos organizativos, económicos y un estudio demuestra que el acuífero tiene capacidad suficiente

### 2.4.2.7 Bombas eólicas

#### Descripción:

Las bombas eólicas normalmente tienen un rotor o molino con varios álabes de acero, que a través de una caja reductora mueven directamente un pistón o un mecanismo de bombeo. Resultan algo caras para la potencia que desarrollan. Requieren de un depósito de agua para asegurar el suministro y satisfacer los picos de demanda. Suelen llevar asociada una red de distribución de agua

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	150 – 200 mm
Profundidad:	hasta 100 metros
Descarga diaria:	3 – 50 m <sup>3</sup>
Depósito de agua:	100% de la descarga diaria
Población (por ud.):	500 - 2000 pers.
Viviendas:	50 - 300

#### Características:

Es aconsejable una red de distribución, ya sean grifos comunales o conexiones domiciliarias. Proporciona un buen nivel de abastecimiento. Apta únicamente para lugares en donde el viento será suficiente en cantidad e intensidad.

#### Construcción:

La construcción de la red de distribución permite implicar a toda la comunidad. Para la bomba hace falta personal especializado.

#### Operación y mantenimiento:

Necesitan poco mantenimiento y ningún repuesto. Una sola persona bien entrenada es suficiente para llevar a cabo la operación y mantenimiento del sistema. En caso de avería sería necesaria la intervención de técnicos especializados,

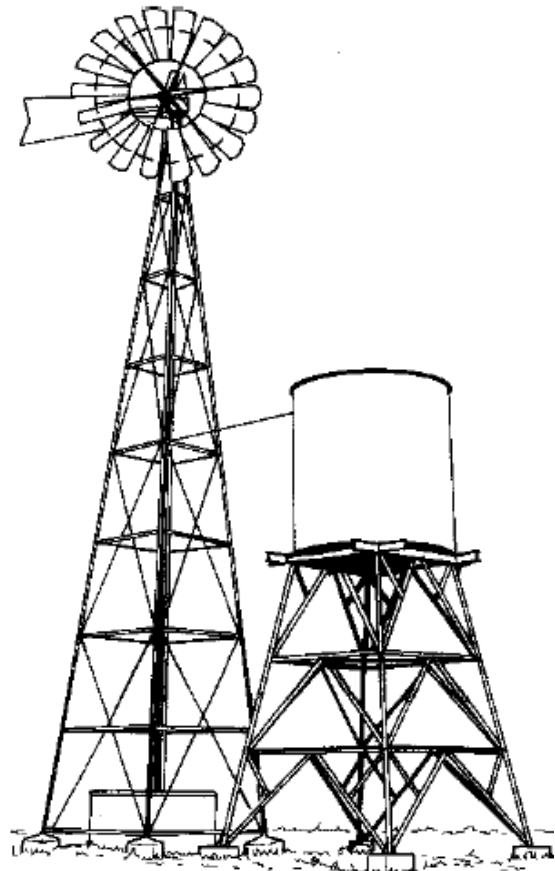


Fig14. Bomba eólica (Baumann, 2000)

#### Coste:

Los costes son función del tamaño de la red de distribución y el tipo de depósito instalado. Por norma general los costes oscilan entre \$35.000 y \$60.000.

Los costes de O&M varían entre \$0,80 y \$1,50 por persona año.

#### Observaciones:

La instalación de este tipo de sistemas sólo está justificada cuando la comunidad receptora cumple los requisitos organizativos, económicos y un estudio demuestra que el acuífero tiene capacidad suficiente

### 2.4.3 Conclusiones

En la descripción de las tecnologías existentes se aprecian grandes diferencias en cuanto a nivel de servicio que unas tecnologías u otras. El nivel de servicio, el tipo de conexión y las implicaciones logísticas y sociales de cada técnica es diferente y satisface un escalón distinto en el objetivo del abastecimiento. Aquí únicamente se han expuesto las principales características sin entrar en un desarrollo detallado.

Apuntar tan sólo que el índice de éxito de los proyectos con bomba manual suele ser mayor que el de otras opciones debido a su sostenibilidad y el alto grado de aceptación que consigue en las comunidades beneficiarias.

Según la SKAT, las bombas manuales son la mejor alternativa cuando se empieza a desarrollar un sistema de abastecimiento de agua, y sólo recomiendan una tecnología superior cuando la comunidad se exprese a favor y asuma los retos económicos y organizativos que la instalación de está supone. Están documentados múltiples casos en los cuales las comunidades rechazan o ignoran costosos sistemas de abastecimiento mediante bombas hidroeléctricas, diesel o solares y en cambio sí aceptan bombas manuales que llegan a asimilar como un elemento más de la comunidad. Una vez más el uso de tecnología apropiada y las directrices VLOM resultan una guía indispensable para el éxito de un proyecto de abastecimiento.

En las figuras 15 y 16 se muestran unos gráficos orientativos elaborados por la SKAT, con los costes típicos de adquisición, operación y mantenimiento de cada sistema en &US per cápita.

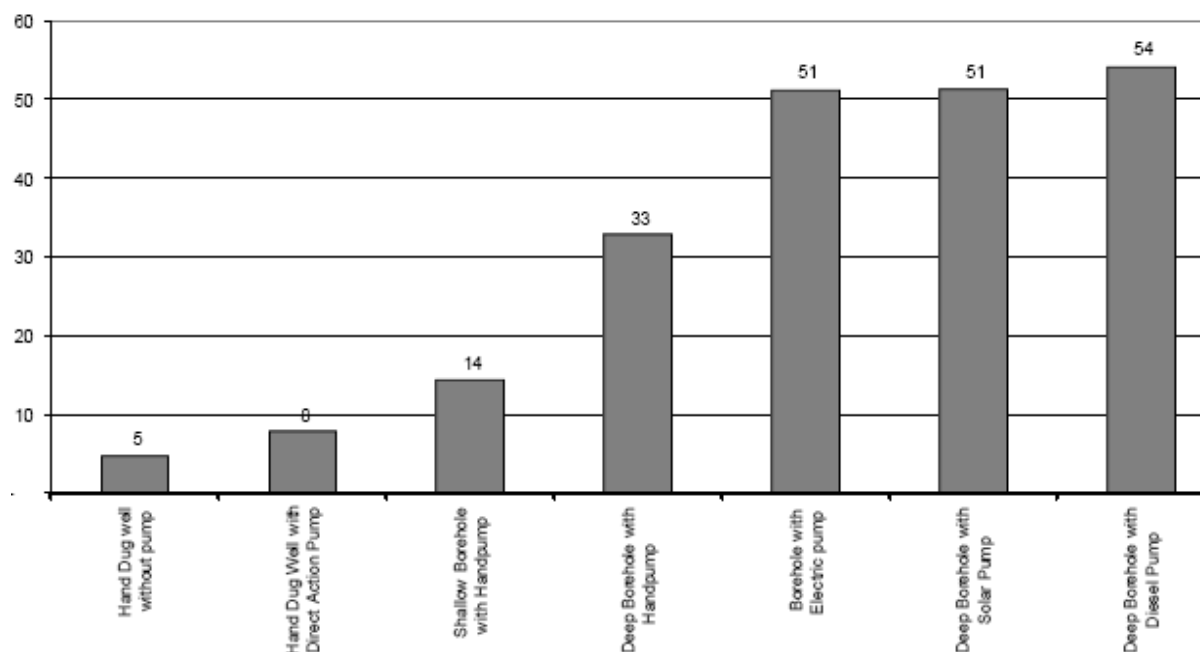


Fig15. Coste per capita (\$US) de los diferentes sistemas de bombeo (Baumann, 2000)

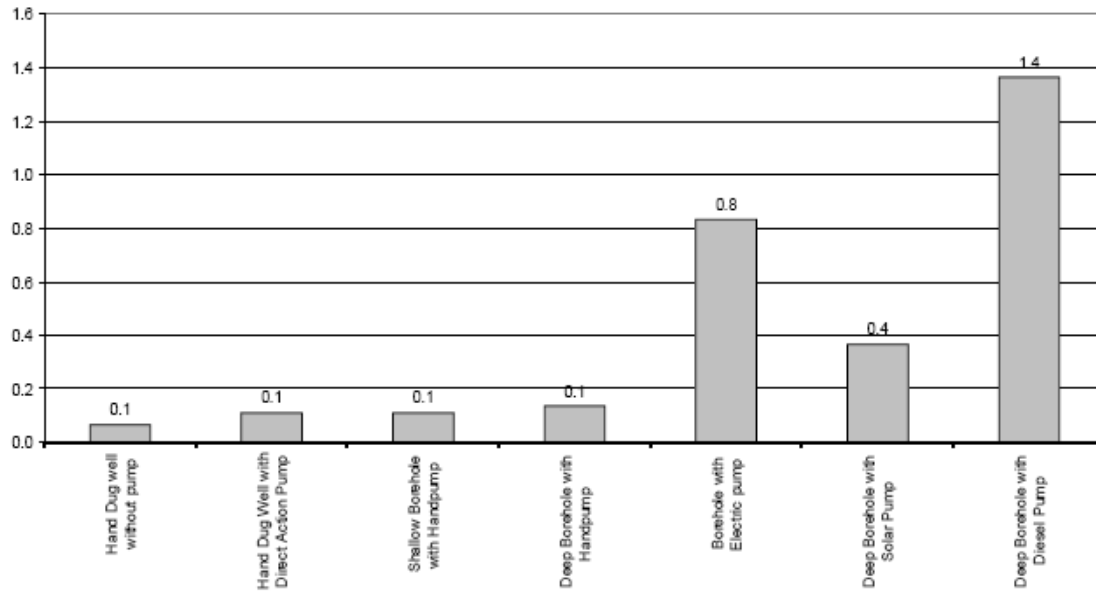


Fig16. Costes de mantenimiento per capita (\$US). (Baumann, 2000)

Organizaciones como el UNICEF o el Banco Mundial también defienden y propugnan la bomba manual como la herramienta más efectiva para mejorar el abastecimiento de agua en las zonas rurales de los países en desarrollo

## 2.5 Esfuerzo Aplicado al Bombeo Manual

Para este capítulo se tomará de guía el trabajo realizado por Tomillo (Tomillo, 2006) en el que se hace una excelente aproximación al esfuerzo humano y las características particulares de este esfuerzo aplicado a una bomba manual.

El principal operador de una bomba manual es el hombre. Por lo tanto el diseño y manejo debe estar orientado a facilitar su manejo por el mismo. Sin elemento motor, esfuerzo humano, no existe bombeo.

El esfuerzo que aplica una persona al manejar una bomba manual es función de la profundidad de bombeo y el caudal bombeado, y éstos están relacionados por el diseño de la bomba.

$$W_{\text{bombeo}} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_{\text{bomba}}}$$

Y a su vez el esfuerzo que aplica una persona es función de la fuerza que aplica y la velocidad con la cual la aplica.

$$W_{\text{bombeo}} = F_{\text{aplicada}} \cdot v$$

Así el ser humano tiene limitada su capacidad de esfuerzo por la fuerza máxima que es capaz de aplicar y por la velocidad de sus movimientos. A parte, múltiples factores físicos y circunstanciales afectan al esfuerzo aplicado, siendo los más importantes:

- La economía de movimientos, individualmente diferente
- Los factores constitucionales, edad, sexo...
- La condición física y psíquica, en dependencia al nivel de entrenamiento, las condiciones de vida y trabajo, la alimentación,...

En los trabajos del Banco Mundial y el Consumer Research Laboratories se tomó como frecuencia típica de bombeo 40 pulsaciones minuto, 50 se consideró un valor apto pero elevado y 80 el máximo valor con el que se experimentó (Reynolds, 1992), por considerarse poco probable que un ser humano desarrollase esfuerzos mayores.

Como valores de referencia se han tomado las siguientes tablas elaboradas por Tomillo, y que se consideran perfectamente válidas para el ámbito del bombeo manual.

**Tabla 2.5.** Potencia nominal de un usuario en el empleo de una bomba manual (Tomillo, 2006)

Sexo	Edad	Ergonomía		T	Humedad relativa	Tiempo bombeo	Alimentación	Condición física	Potencia nominal
Hombre	20-30 años	Buena	Brazos	20°C	Media	<15min	Adecuada	Normal	2W/Kg
			Pedaleo						2,6W/Kg
Mujer			Brazos						1,5 W/Kg
			Pedaleo						2 W/Kg

De acuerdo a la tabla 2.5, una mujer de 55kg de peso es capaz de, en plenas condiciones físicas de desarrollar una fuerza de 82,5W durante un tiempo inferior de 15min. Si recordamos lo expresado en el punto 2.2, en el cual se calculaba que el tiempo de bombeo típico es superior a 15min más el tiempo y esfuerzo de desplazar el agua al hogar, la conclusión es que la potencia desarrollable por una persona esta limitada y se resalta una vez más la importancia de facilitar el esfuerzo y reducir las distancias entre el punto de suministro y los usuarios.

En la siguiente tabla (tabla 2.6) se expresa de manera resumida la todos los factores que limitan la capacidad de esfuerzo en el bombeo manual.

**Tabla 2.6.** Porcentaje de potencia desarrollable que se alcanza respecto al valor de la potencia nominal, por una usuaria de una bomba manual, para distintos factores condicionantes. (Tomillo, 2006)

%		Hombre					Mujer				
Edad		<14	14-20	20-30	30-40	>40	<14	14-20	20-30	30-40	>40
		75	90	100	90	75	85	90	100	85	70
Distancia media a la fuente	< 5min	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<60min	80	90	95	90	80	80	90	95	85	75
	>60min	60	70	80	80	65	60	70	80	75	60
Tiempo de bombeo	<15min	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<30min	80	90	95	90	75	80	90	95	85	70
	>30min	60	70	80	80	65	60	70	80	75	60
Ergonomía del equipo	Media	90	95	100	95	90	90	95	100	90	85
	Baja	85	90	95	90	85	85	90	95	85	80
Temperaturas	Altas	85	90	95	90	85	85	90	95	85	80
Humedad relativa	Alta	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80
Alimentación	Mala	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80
Condición física	Mala	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80

Y como conclusión Tomillo propone los siguientes valores de referencia expresados en la tabla 2.7:

**Tabla 2.7.** Potencia desarrollable de referencia en el empleo de bombas manuales en países del tercer mundo, (Tomillo, 2006)

	Parte del cuerpo empleada	Potencia desarrollable
Hombre	Piernas: pedaleo	100 W
	Brazos: manivela, palanca	70 W
Mujer	Piernas: pedaleo	75 W
	Brazos: manivela, palanca	50 W
Niña/niño	Piernas: pedaleo	65 W
	Brazos: manivela, palanca	40 W

## 3 Diseño de un Banco de Ensayos de Bombas Manuales

### 3.1 *Planteamiento Inicial*

El objetivo del diseño del banco de ensayos es habilitar un espacio para la prueba y experimentación de bombas manuales. El laboratorio en sí persigue una triple finalidad docente, demostrativa y de I+D.

- *Uso docente:* La instalación resultante del proyecto servirá como base para introducir a aquellos alumnos interesados en tecnologías apropiadas y bombeo manual
- *Uso demostrativo:* El laboratorio estará abierto a todos, especialmente cooperantes y ONG's, para que conozcan de primera mano las tecnologías empleadas en los países en desarrollo.
- *Uso experimental:* Se espera que el laboratorio aporte información acerca del funcionamiento, problemática y diseño de bombas manuales en particular, y tecnologías apropiadas en general.

Por ello, la primera premisa del diseño ha sido la sencillez y la representatividad, de manera que cualquiera pueda entender y operar el laboratorio satisfaciendo sus curiosidades e inquietudes.

Después de consultar diversas fuentes se ha considerado habilitar tres puestos de trabajo de bombas manuales. Los dos primeros estarán acondicionados para bombas manuales de pistón, de succión, de acción directa y de diafragma, lo bastante similares entre sí como para compartir infraestructuras y el tercero estará especialmente indicado para bombas de mecate.

La instrumentación y medida precisa de los parámetros de funcionamiento de las bombas son también un objetivo del laboratorio, pero en cualquier caso supeditado a la funcionalidad y sencillez de un laboratorio docente y de uso general.



### 3.2 Selección de Bombas Manuales

En una primera fase del laboratorio han de seleccionarse tres bombas manuales. Estas serán lo más representativas posible del mercado actual. Para las dos primeras, dentro de las tecnologías existentes, se ha decidido seleccionar dos bombas de pistón, por ser estas las más comunes y las que más se acercan a los conceptos VLOM. Para el último puesto la elección ha sido una bomba de mecate, tecnología de bombeo que esta alcanzando gran notoriedad en los últimos años.

Se quiere seleccionar bombas que abarquen las profundidades típicas de bombeo y que abarquen las tendencias actuales de desarrollo e implantación de bombas manuales

En el libro “The Handpump Option” (Arlosoroff, 1987) se apunta que aproximadamente el 75% de las bombas manuales opera a profundidades iguales o inferiores a 20 metros, elevándose este valor al 85% cuando la profundidad alcanza los 25 metros. Como se aprecia en el siguiente gráfico la profundidad media de los pozos esta en 12 metros.

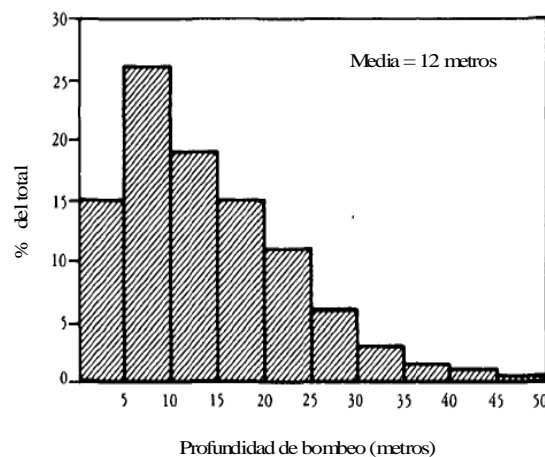


Fig17. Profundidades medias de bombeo manual (Arlosoroff, 1987)

Se puede esperar que este valor medio hay aumentado ligeramente desde 1987 porque, desde entonces las bombas de pozo profundo (India Mark II y III, Afridev y modelos derivados) han alcanzado un nivel de desarrollo VLOM que ha permitido su implantación en un número mayor de comunidades. En cualquier caso no se cree que el valor medio de profundidad de pozo alcance valores superiores a 15 – 20m

Dentro del mercado de las bombas manuales existen una serie de modelos, denominados de dominio público, con especificaciones y licencia de fabricación abierta. La mayoría de estas bombas tienen un diseño VLOM y son las recomendadas por los organismos internacionales para los proyectos de cooperación al desarrollo como tecnología apropiada, y fácilmente transferible al país usuario. Estas son:

- De succión: No 6
- De acción directa: Tara, Maya-Yaku, Malda
- De media y alta profundidad: Jibon, Walimi, India Mark II y III, Afridev, U3M, BUSH

- De pozo muy profundo: India Mark II adaptada, Bush con cilindro de 50mm, Afridev adaptada
- De cuerda: Bomba de Mecate

Anotar que todos estos modelos están en constante desarrollo, actualizándose cada cierto tiempo para incorporar los problemas que van surgiendo por su uso intensivo. La SKAT se encarga de mantener actualizada y de uniformizar la información datándose en el siglo XXI las últimas revisiones técnicas incorporadas a todos los modelos. En la figura 18 se observa como las bombas de dominio público cubren todo el rango de profundidades de bombeo con bomba manual.

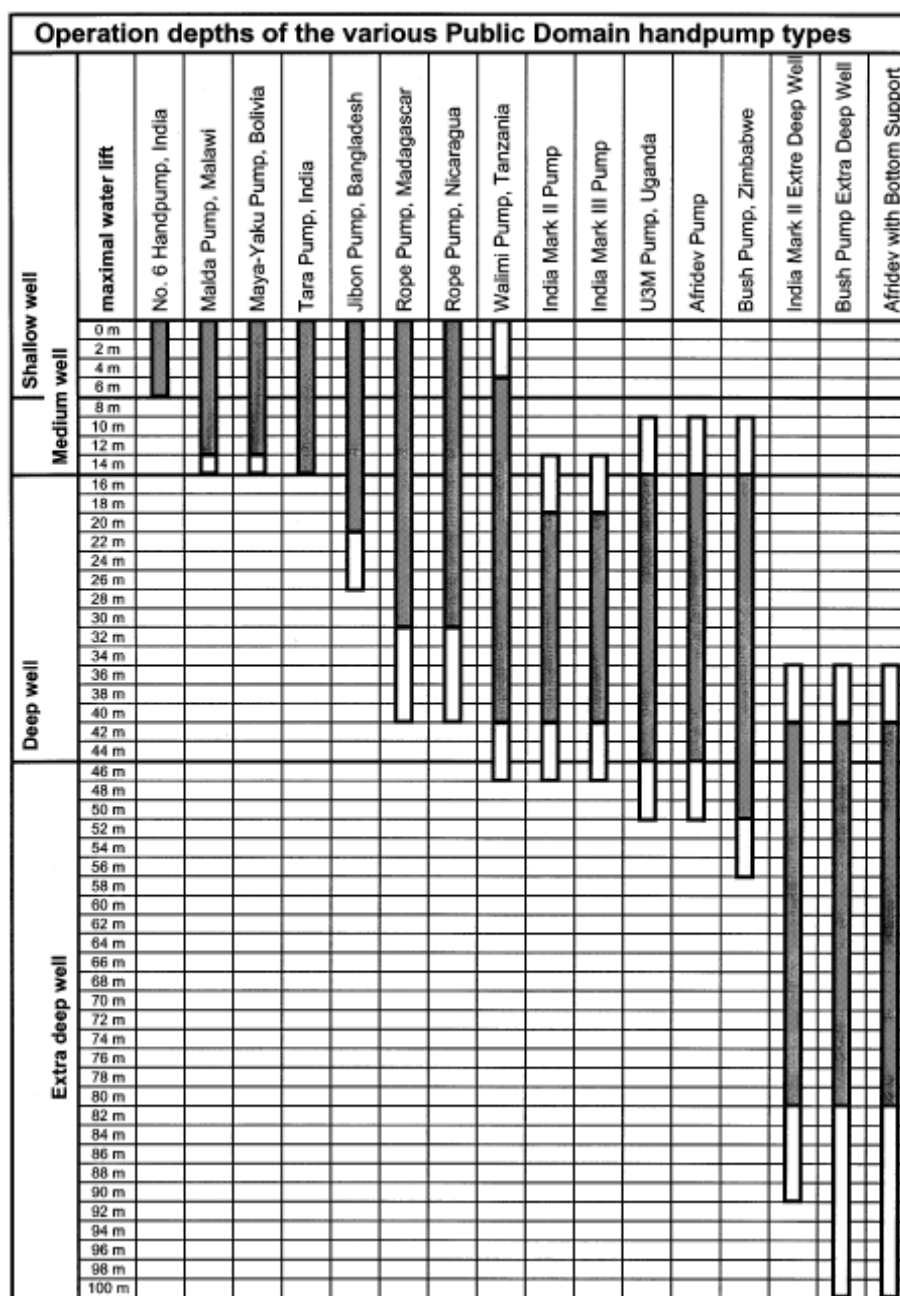


Fig18. Rango de operación de las bombas de dominio público (Erpf, SKAT 2002)

Además de estas bombas, los modelos Nira, del fabricante finlandés Vammalan Konepaya, gozan de muy buena aceptación entre las comunidades usuarios y su diseño también es afín a los conceptos VLOM pero fuera del dominio público. La bomba manual más popular de este fabricante es la bomba de acción directa Nira AF85, indicada para profundidades entre 2 – 15 m.

De las bombas de dominio público las más extendidas son la No. 6, la Malda, la Tara, la India Mark II y la Afridev y la bomba de mecate. De estas se descartan para el laboratorio la No. 6, bomba de succión no apta para un uso intensivo (poco robusta) y cuya escasa profundidad de bombeo está causando problemas por el descenso de la capa freática en ciertas zonas del globo. La Tara también se descarta por tener un diseño poco robusto para el laboratorio, aunque sí está muy recomendada para su uso por pequeñas comunidades.

Sólo en la India se estima que hay más de 2.500.000 de bombas manuales instaladas, por lo que a nivel mundial, aunque no hay estudios precisos, el número total de bombas manuales instaladas es enorme.

Realizada la primera criba por su difusión y representatividad quedan dos bombas de acción directa, la Malda y la Nira AF85 (de 0 a 15m) y las bombas de pozo profundo India Mark II y Afridev (de 10 a 45m) y la bomba de cuerda o mecate. Observar que entre las dos parejas de bombas se cubre perfectamente el rango de profundidades típico enunciado antes.

A la hora de seleccionar una bomba de pistón u otra se tomaron como factores de decisión, la difusión de la misma, un diseño VLOM y las recomendaciones de los expertos consultados (Tomillo, Erpf). Para la decisión final de preseleccionaron la Afridev y la India Mark II de pozo profundo y la Malda y la Nira AF85 de acción directa.

**Cuadro de decisión**

	Diseño VLOM	Precio	Caudal de bombeo	Dominio público	Difusión	Expertos
Nira AF85	5	3	5	No	4	X
Malda*	5	4	5	Si	2*	✓
India Mark II	3	5	5	Si	5	X
Afridev	4	3	5	Si	4	✓

\*Malda es un modelo relativamente nuevo lo que limita su difusión

Al final se escogió la Malda frente a la Nira AF85 por ser la primera de dominio público, presentar características técnicas similares, y resultar la Malda bastante más barata, \$186 frente a los \$420 de la Nira. En el caso de las bombas de pozo profundo se escoge la Afridev por ser VLOM, además la difusión de la India Mark II está falseada por ser la bomba mayoritaria en la India, país densamente poblado, pero a nivel global la Afridev goza de mayor popularidad. En ambos casos la elección se vio reforzada por las recomendaciones de la SKAT.

En cuanto a la bomba manual se decidió llevar a cabo un desarrollo tecnológico completo, del cual una de las consecuencias será la fabricación de un modelo específico para el banco de ensayos.

### 3.2.1 Bomba manual Malda

El origen de la bomba de acción directa MALDA esta en Malawi, dentro del programa gubernamental de “Pozos de baja profundidad”. Este programa comenzó a finales de la década de los setenta para proteger y garantizar el suministro en los pozos preexistentes mediante la mejora del pozo y la instalación de bombas manuales de acción directa. En esa época se instalaron aproximadamente 6500 bombas, y los modelos más empleados fueron: Malawi Mark V, Madzi, Shire y Nira AF85.

En los años 1987/88 se probó por primera vez un modelo modificado de la Afridev de acción directa. Un total de 45 unidades fueron experimentadas entonces (1990/91). En 1993, el ministerio de trabajo de Malawi pidió al Banco Mundial, ONU, RWSG-EA y al departamento de agua de la UNICEF una evaluación de las bombas de acción directa empleadas en el país. Antes de la finalización del estudio se decidió el diseño de una nueva bomba de acción directa.

En cierta medida, el éxito de la Tara, diseñada bajo los preceptos VLDM, en Bangla Desh e India ayudó a las organizaciones involucradas a decidirse por un nuevo diseño específico para África. La Tara resultaba ineficaz en este continente por que el número de usuarios por bomba era mayor el previsto en el diseño de la bomba. También influyó que, hasta el desarrollo de la Malda, la bomba Nira AF85, de muy buenas prestaciones, era la mejor opción disponible para ese tipo de aplicaciones y no estaba dentro del dominio público.

En 1994, UNICEF, encargó las primeras 100 unidades, fabricadas e instaladas por las propias comunidades. Esta nueva bomba se conoció como **Malawi Direct Action Pump** (Fig19). Las primeras especificaciones técnicas de la bomba fueron publicadas en 1997. Desde entonces es bastante frecuente en países como Malawi, Kenya y Madagascar.



Fig19. Bomba de acción directa Malda (SKAT, 2005)

### 3.2.1.1 Especificaciones técnicas

En este apartado únicamente se van a esbozar las características fundamentales de la bomba, para más información se pueden consultar las especificaciones técnicas de la SKAT de dominio público: “Malda Handpump Specification. Revision 2-2005”

La Malda es una bomba de acción directa, especialmente recomendada para profundidades entre 5 y 12 m, pudiendo operar hasta 15m de profundidad. El funcionamiento de las bombas de acción directa esta basado en el empleo de varillas ligeras, de gran diámetro, que distribuyen la aplicación del esfuerzo a las dos carreras, siendo el principal el realizado al bajar el pistón. Este modelo de bomba presenta un excelente potencial VLOM tanto en manejo y reparación como en su fabricación.

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	50 mm	
Carrera del pistón:	410 mm	
Caudales aprox. (75W):	a 5 m	3,5 m³/h
	a 10 m	1,8 m³/h
	a 15 m	1,2 m³/h
Rango de profundidades:	2 – 15 m	
Usuarios por bomba:	300 aprox.	
Nivel de abastecimiento:	15 – 20 litros/persona día	
Tipo de pozo:	Excavado ó perforado	

#### Materiales:

• Cuerpo de la bomba	acero galvanizado
• Accionador	acero galvanizado
• Forro del accionador	acero inoxidable
• Varilla	tubería HDPE
• Tuberías	tubería HDPE
• Cilindro del pistón	HDPE
• Pistón	HDPE
• Válvula de pie	HDPE

Por ser un modelo relativamente reciente no hay desarrolladas evoluciones del diseño original. Por ello las opciones para la configuración de la misma son pocas (ver tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Opciones disponibles. Bomba MALDA (Erpf, SKAT 2002)

### Bomba manual Malda

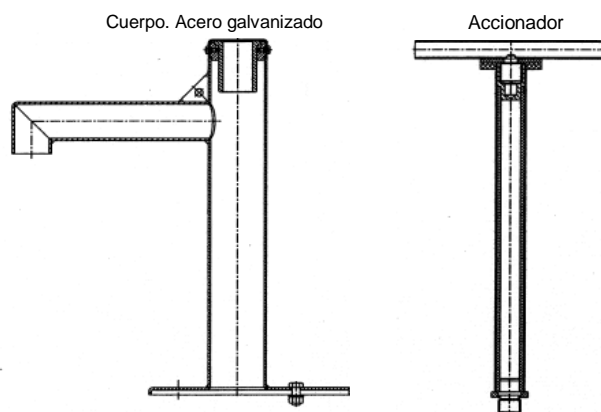
Lista de opciones disponibles:

Opciones	A	B
<b>Cuerpo de la bomba</b>	Cuerpo con accionador y pedestal. Plano A5002	Cuerpo con accionador & soporte ISO. Plano D9098
<b>Tubería de ascensión</b>	Tuberías de HDPE con abrazaderas para las uniones reforzadas	---
<b>Pistón + Válvula de pie</b>	Forro de fricción, pistón y válvula de pie de HDPE. Plano A5004	---
<b>Varillas</b>	Tuberías de HDPE reforzadas. Plano A5006	---

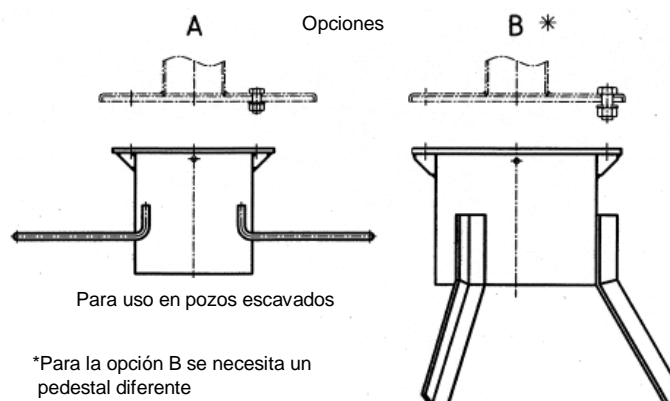
**HDPE:** Polietileno de alta densidad

**ISO:** Organización internacional de estándares

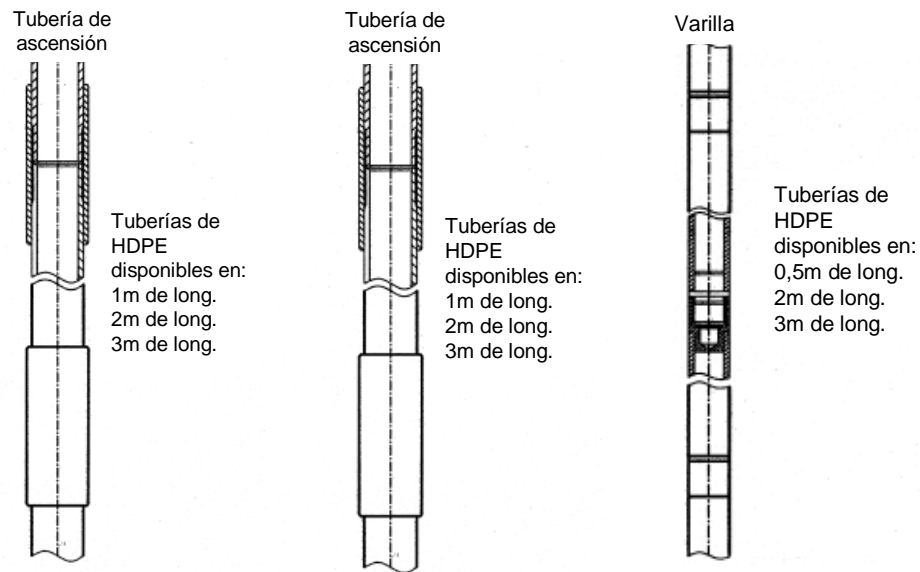
Se escoge la opción A-A-A-A por ser más fácil de instalar en el laboratorio.



**Fig20.** Cuerpo y accionador de la Malda



**Fig21.** Tipos de base y sujeción



**Fig22. Elementos subterráneos**

En las figuras anteriores (20, 21 ,22) se ven los principales componentes de las bombas y las opciones existentes.

A continuación se incluyen los planos más representativos (Fig23, Fig24, Fig25 y Fig26) de la Malda:

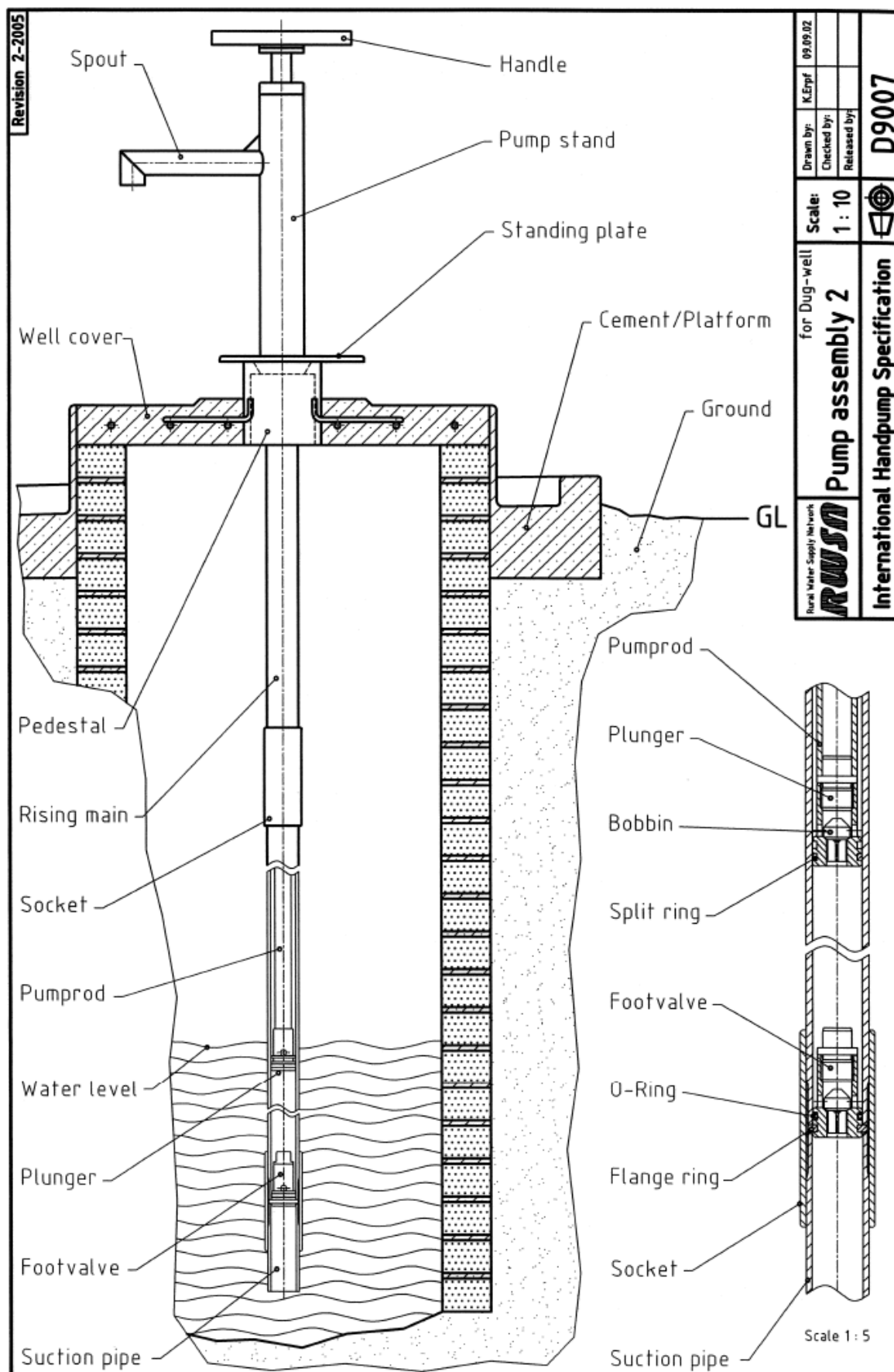


Fig23. Bomba Malda ensamblada, (SKAT, 2005)



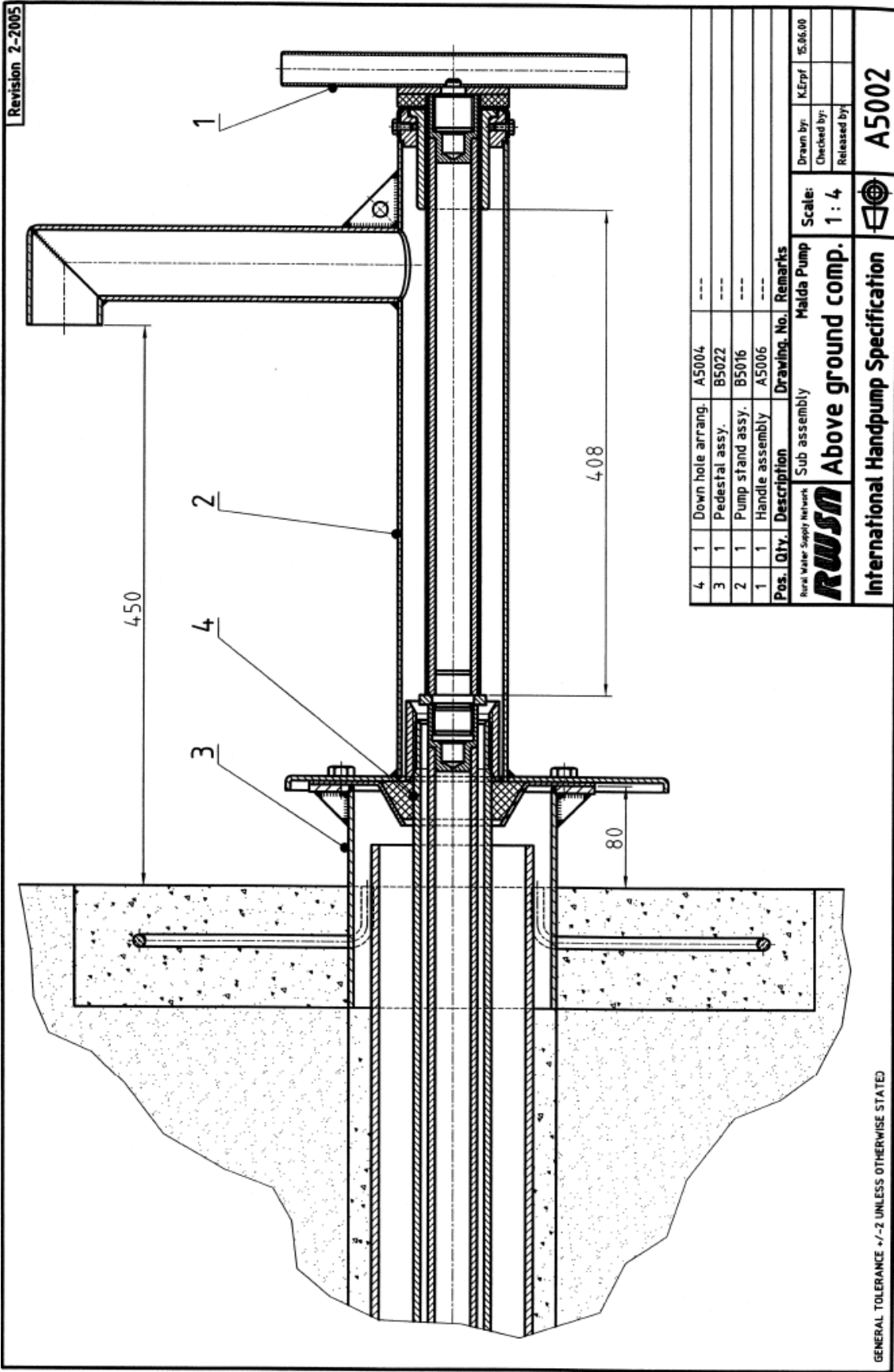


Fig24. Componentes y ensamblaje del cuerpo de la bomba (SKAT, 2005)

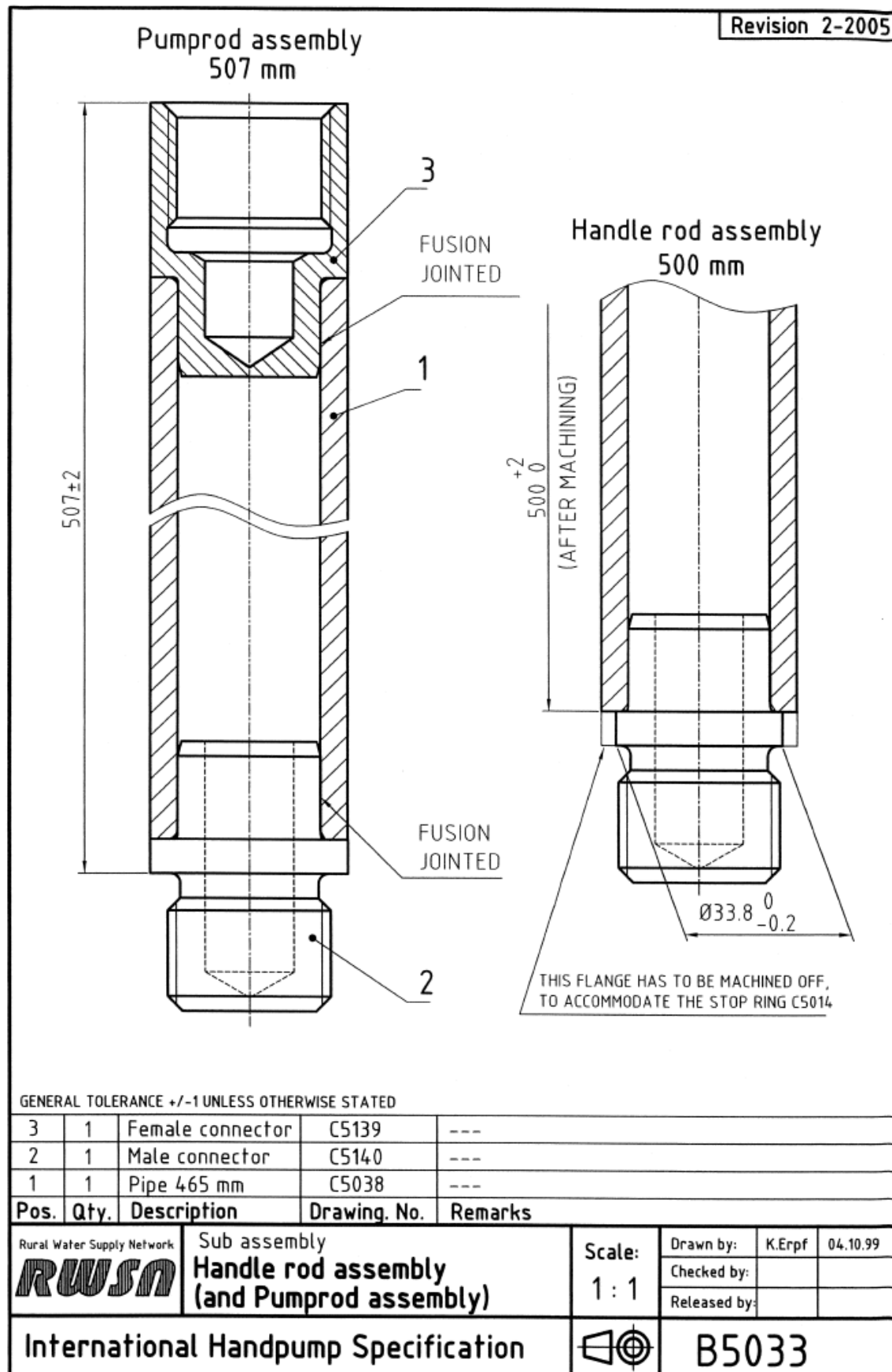
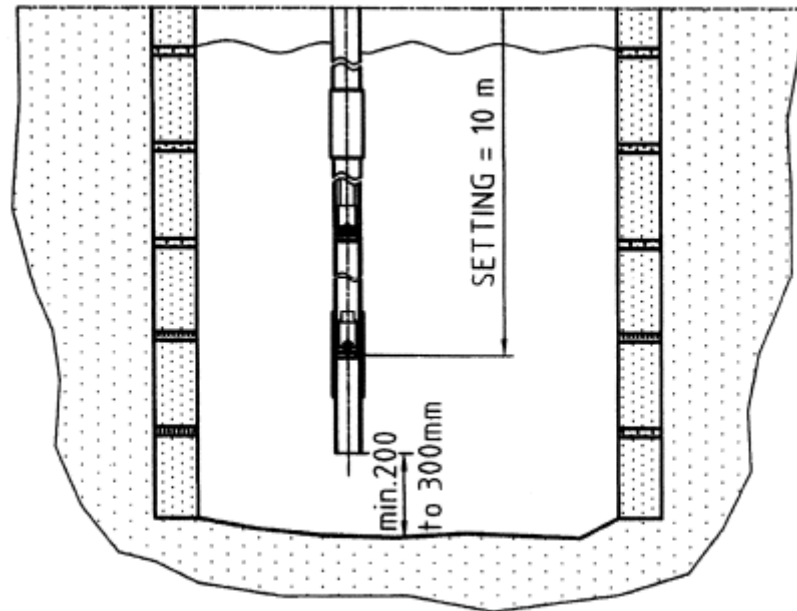


Fig25. Ensamblaje de la varilla (SKAT, 2005)



Además de los planos técnicos y de fabricación en las especificaciones técnicas viene detallada la instalación de los componentes subterráneos. En la Malda el DWL ó PWL en la estación seca debe estar, al menos, un metro por encima de la válvula de pie. Asimismo la distancia entre el fondo y la entrada de la tubería de succión debe ser superior a 200mm (Fig27) para evitar que entre arena en el sistema. En el banco de ensayos no será necesario dejar tanta distancia al no existir fondo arenoso. Se considera que con un valor de 100mm será más que suficiente.



**Fig27. Instalación de los componentes subterráneos.**  
(MALDA Installation and Maintenance Manual, SKAT, 2003)

El mantenimiento de la bomba viene especificado en el manual de la SKAT de instalación y mantenimiento (SKAT, 2003). En ningún caso requiere más de una persona convenientemente entrenada para realizar el mantenimiento y las reparaciones típicas. Las herramientas necesarias son simples y vienen especificadas por la SKAT. No es necesario ningún equipo especial para introducir o sacar los componentes subterráneos.

También viene en las especificaciones una tabla de selección de tuberías en función de la profundidad de bombeo, muy útil para situar el pistón a la distancia óptima respecto a la válvula de pie (Fig28).

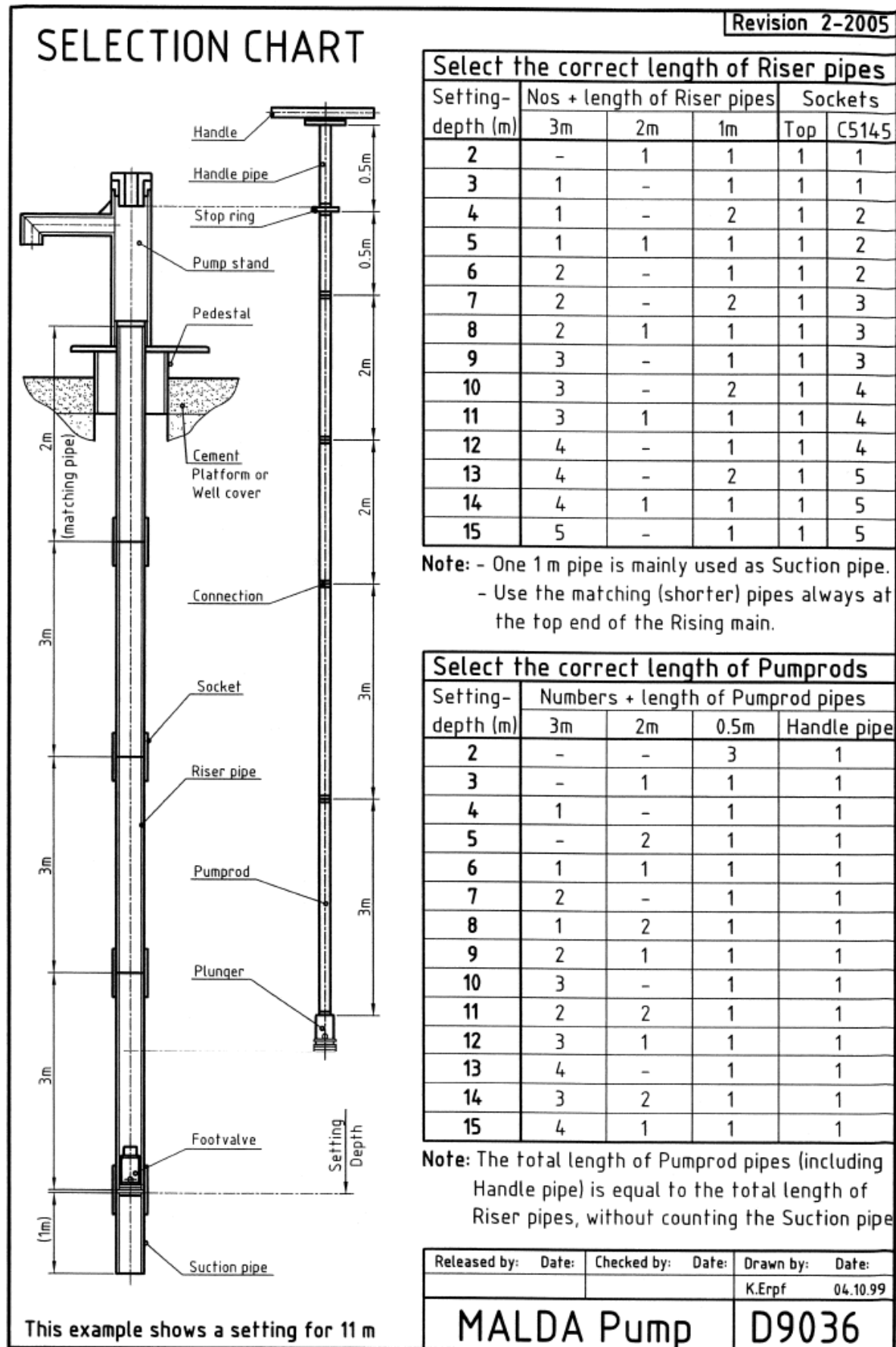


Fig28. Tabla de selección de componentes (SKAT 2005)

### 3.2.1.2 Cálculos previos

Aquí se va a caracterizar de manera teórica el funcionamiento de la bomba de manera que se obtengan unos primeros valores útiles tanto para el diseño del banco de ensayos como para disponer de unos datos teóricos con los que comparar el funcionamiento experimental de la bomba.

La bomba de acción directa es de doble efecto, es decir, se produce bombeo en ambas carreras. En la carrera descendente la válvula de pie permanece cerrada y la válvula del pistón permanece abierta dejando pasar agua al interior de la tubería de ascensión. La varilla en las bombas de acción directa tiene un diámetro próximo al de la tubería de ascensión lo cual provoca un desplazamiento de agua junto con el movimiento y que se traduce en el bombeo. El volumen de agua bombeado en esta carrera ( $e$ ) es:

$$V_{bajada} = \pi \cdot (d_{\text{varilla}} / 2)^2 \cdot e$$

En la carrera ascendente se invierte la situación de las válvulas, la de pie permanece abierta y la del pistón cerrada. Esto provoca que junto con el movimiento se desplace agua que desborda por el caño y que, mediante succión se llene de nuevo el cilindro. El volumen bombeado por carrera ( $e$ ) es:

$$V_{subida} = (\pi \cdot (d_{\text{tubería}} / 2)^2 - \pi (d_{\text{varilla}} / 2)^2) \cdot e$$

Por lo que el volumen bombeado por carrera completa es la suma de ambos movimiento:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{bajada}} + V_{\text{subida}}$$

El volumen total por carrera completa,  $V_{\text{total}} = 0,5127 + 0,3338 = 0,8466 \text{ l}$ .

El hecho de emplear una varilla de un diámetro elevado junto con materiales ligeros (plásticos) hace que, por el principio de Arquímedes, el empuje sea una fuerza considerable y que cambia la relación de fuerzas. Como luego se verá más detalladamente la fuerza principal a realizar esta en la carrera descendente y no en la carrera ascendente.

Para el usuario es más sencillo aplicar fuerza en la carrera descendente ayudándose del peso de su cuerpo que en la carrera ascendente.

En condiciones normales la frecuencia de aplicación en una bomba manual oscila entre 40 – 50 paladas por minuto dependiendo de la ergonometría y profundidad de bombeo. En el trabajo del Consumer Research Laboratory se consideró como frecuencia máxima 80 paladas por minuto (Reynolds, 1992). Con el volumen y la frecuencia de aplicación es fácil calcular unos caudales teóricos de funcionamiento, valores que serán bastante aproximados a la realidad ya que el rendimiento volumétrico suele ser muy alto en estas bombas (>90%)

$$Q = V \cdot f$$

**Tabla 3.2.** Caudales teóricos de bombeo de la Malda

Nº de paladas por minuto	Frecuencia (Hz)	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)	Caudal (l/h)
15	0,25	0,2116	12,70	761,9
20	0,33	0,2822	16,93	1015,9
30	0,5	0,4233	25,40	1523,9
40	0,67	0,5644	33,86	2031,8
50	0,83	0,7055	42,33	2539,8
60	1	0,8466	50,80	3047,7
70	1,17	0,9877	59,26	3555,7
80	1,33	1,1288	67,73	4063,7

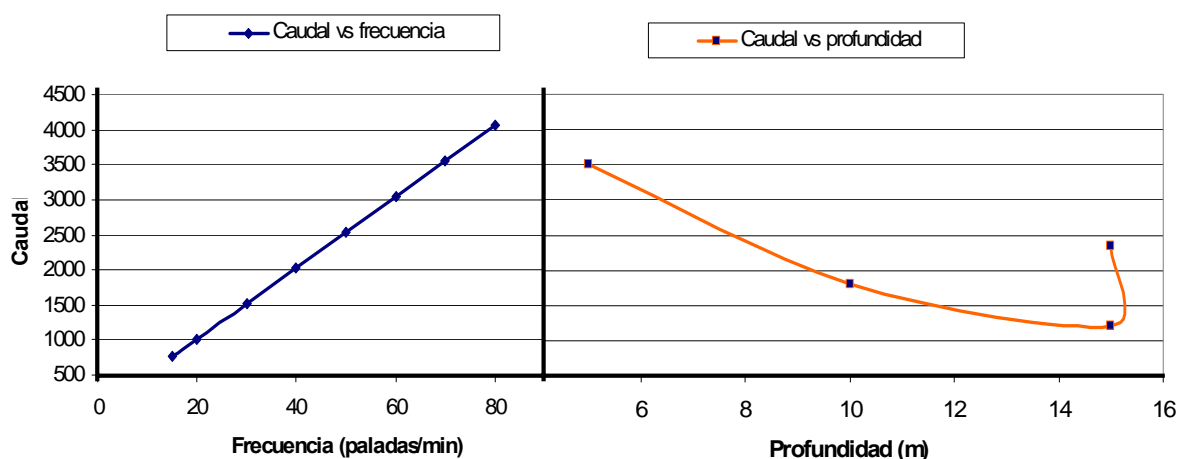
En la tabla 3.2 se observa como los caudales de bombeo son bastante elevados si se tiene en cuenta que para profundidades de 7m se considera un caudal de bombeo adecuado 19l/min (Arlosoroff, 1987) y la frecuencia normal de aplicación en una bomba manual es 40, 50 paladas minuto.

Si se compara la tabla 3.2 con la 3.3 de valores experimentales de otras fuentes se aprecia una congruencia hacia unas frecuencias de bombeo típicas (alrededor de 50 carreras/min).

**Tabla 3.3.** Caudales experimentales de la Malda

Altura de bombeo (m)	Caudal (l/min)	Caudal (l/h)	Potencia (W)	Rendimiento total	Fuente
5	58,33	3500	75		SKAT
10	30	1800	75	65,3%	SKAT
15	20	1200	75	65,3%	SKAT
15	39,17	2350			MEERA

Con los valores obtenidos en las tablas anteriores se expresa en al figura 29 de manera gráfica la relación entre caudal, frecuencia de aplicación y profundidad de bombeo



**Fig29.** Caudal vs frecuencia de bombeo y profundidad

Tanto en las tablas como en el gráfico se observa que el valor de caudal proporcionado por MEERA parece desproporcionado respecto a los valores de la SKAT. El valor proporcionado por MEERA (fabricante indio) resulta inverosímil tanto por su contraste con los valores proporcionados por la SKAT (órgano independiente) como por referirse a una profundidad para la cual el empleo de la Malda no está recomendado.

Por otra parte, el esfuerzo humano aplicado a la bomba será el que junto a las características de la bomba, determine el caudal, frecuencia y funcionamiento del conjunto. Aquí se realizan unos cálculos sencillos para estimar el funcionamiento de la Malda en función del esfuerzo aplicado.

Para el cálculo del esfuerzo realizado se han obtenido las siguientes características de la Afridev:

### **Volumen desalojado:**

Densidad:	1000 kg/m <sup>3</sup> (agua)
Sección:	0,001256 m <sup>2</sup>
Peso =	1,256 kg/m

### **Peso de la varilla:**

Material:	HDPE/PE80
Densidad:	960 kg/m <sup>3</sup>
Área varilla:	0,0005961 m <sup>2</sup>
Peso =	0,5722 kg/m

### **Peso del pistón:**

Material:	HDPE/PE80
Densidad:	960 kg/m <sup>3</sup>
Volumen:	7,05 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>
Peso =	0,07 kg

### **Peso de los conectores:**

Material:	HDPE/PE80
Densidad:	960 kg/m <sup>3</sup>
Volumen:	3,083 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup>
Nº de conectores:	3 ud
Peso =	0,0887 kg

### **Peso del accionador:**

Material:	Acero ST 320, ISO 65, NB20, médium (3/4")
Densidad:	7800 kg/m <sup>3</sup>
Sección accionador:	0,00012 m <sup>2</sup>
Longitud:	0,28 m
Peso =	0,262 kg

En el movimiento aparecen las siguientes fuerzas:

- *Fuerza por principio de Arquímedes.* El principio de Arquímedes dice que todo cuerpo sumergido en un fluido sufre una fuerza de flotación igual al volumen de líquido desalojado por la densidad del mismo. Este efecto en la carrera de bajada será contrario al movimiento y en la de subida favorable.
- *Fuerza por peso de los componentes.* El conjunto de varillas, válvulas, accionador... tiene un peso que hay que mover. En la carrera de bajada será favorable y en la de subida desfavorable



- *Fuerza por ascensión de agua.* En la carrera de subida, con la válvula del pistón cerrada hay que elevar el peso del agua.
- *Fuerza válvula del pistón.* Al hacer pasar el agua de una zona no presurizada a una presurizada hay que hacer un esfuerzo. Aparecerá únicamente en la carrera de bajada.
- *Fuerzas de fricción.* Siempre contrarias al movimiento. La Malda al trabajar a poca profundidad y carece de forro de fricción por lo que es de esperar que estas fuerzas sean pequeñas

La fuerza en la carrera de bajada es:

$$F_{bajada} = F_{arquimedes} - F_{peso} + F_{válvula} = V_{desalojado} \cdot \rho \cdot g - P_{componentes} \cdot g + \rho \cdot g \cdot h \cdot A_{válvula}$$

La fuerza que aparece debido al paso de agua a través de la válvula del pistón es el valor más difícil de calcular. Por no complicar innecesariamente el proceso de cálculo se ha aproximado el valor del área real al 20% de la sección total del pistón. Esta aproximación es conservadora y es de esperar que el esfuerzo real sea inferior.

Y en la carrera de subida

$$F_{subida} = F_{agua} + F_{peso} - F_{arquimedes} = (\rho \cdot g \cdot h + P_{atm}) \cdot A_{real} + P_{componentes} \cdot g - V_{desalojado} \cdot \rho \cdot g$$

La fuerza total realizada en un movimiento completo es la suma de la fuerza realizada en la carrera de bajada más la fuerza realizada en la carrera de subida.

$$F_{total} = (F_{bajada} + F_{subida}) \cdot K$$

A la fuerza resultante se le aplica un factor de corrección K del 10% para compensar las aproximaciones realizadas. Una vez obtenida la  $F_{total}$  se halla el esfuerzo resultante:

$$W_{bombeo} = F_{total} \cdot f \cdot carrera$$

**Tabla 3.4.** Esfuerzos teóricos de bombeo de la Malda

Profundidad (m)	F aplicada (KN)	Carrera (m)	Frecuencia (Hz)							
			0,25	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33
2	26,62	0,408	5,43	7,24	10,86	14,48	18,10	21,72	25,34	28,96
5	66,55	0,408	13,58	18,10	27,15	36,20	45,25	54,30	63,35	72,40
7	93,16	0,408	19,01	25,34	38,01	50,68	63,35	76,02	88,69	101,36
10	133,09	0,408	27,15	36,20	54,30	72,40	90,50	108,60	126,70	144,80
12	159,71	0,408	32,58	43,44	65,16	86,88	108,60	130,32	152,04	173,76
15	199,64	0,408	40,73	54,30	81,45	108,60	135,75	162,90	190,05	217,20
<b>Caudal</b>		(l/min)	12,7	16,9	25,4	33,8	42,3	50,8	59,2	67,72
		(l/h)	762	1016	1524	2033	2540	3047	3556	4063

En la tabla 3.4 se han destacado los esfuerzos asumibles por una persona (40 – 100 W). También se observa la concordancia entre los valores proporcionados por la SKAT y los hallados teóricamente. Por los márgenes de seguridad y aproximaciones realizadas durante el proceso de cálculo es de esperar que durante la experimentación en el laboratorio se obtengan caudales algo superiores.

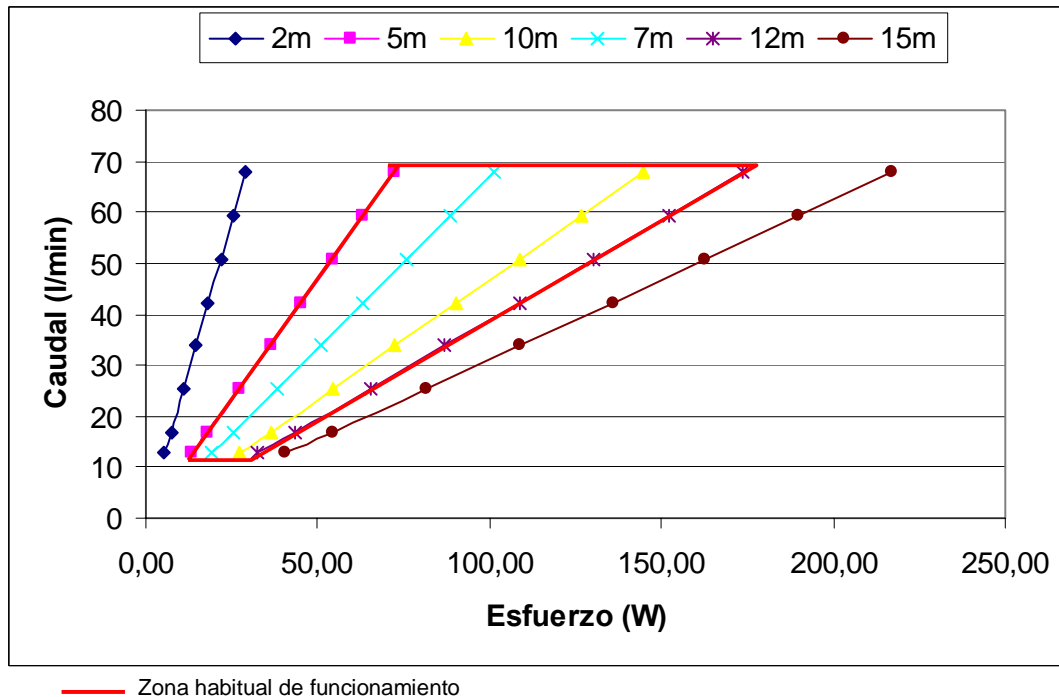


Fig30. Caudal vs Esfuerzo. MALDA

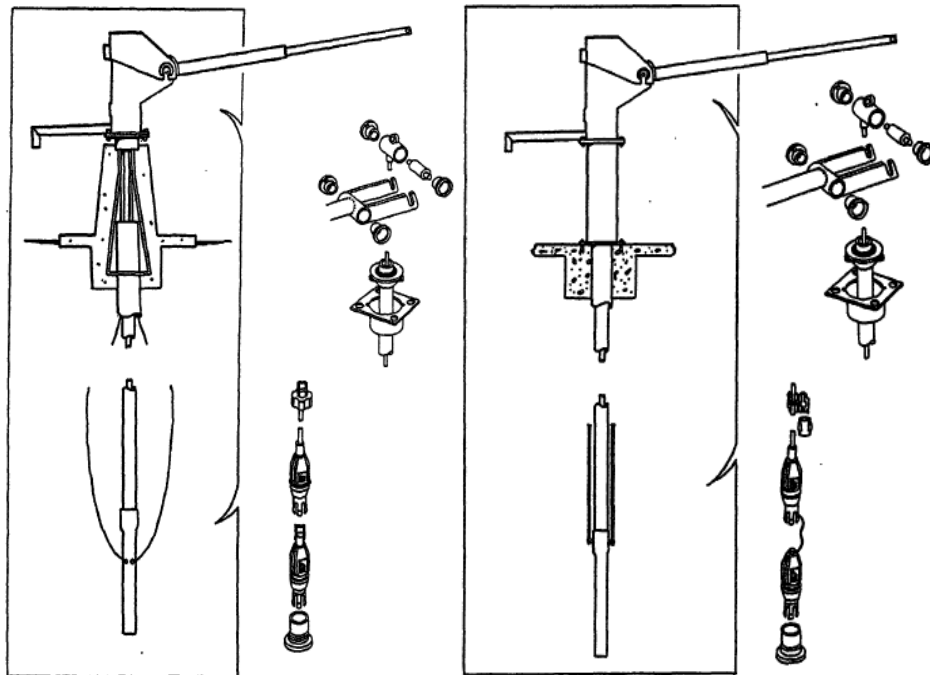
En la anterior gráfica se observa de manera más intuitiva la relación entre el caudal obtenido el esfuerzo aplicado en función de la profundidad. El rango habitual es de 5 a 12m porque para profundidades inferiores la bomba de succión presenta un funcionamiento similar y es más barata de fabricar y operar. Para profundidades superiores a 12m el esfuerzo es excesivo para los caudales que se obtienen y es recomendable optar por otro tipo de bombas.

### 3.2.2 Bomba manual Afridev

El desarrollo de la bomba comenzó en 1981 en Malawi, bajo el nombre de Maldev y no fue hasta 1985, ya en Kenya, cuando se fabricó el primer prototipo de Afridev, a partir de las conclusiones del trabajo de campo realizado con la Maldev. El objetivo que impulsó todo el trabajo fue la consecución de una bomba manual de pozo profundo (hasta 45m) que siguiera los conceptos VLDM. Frente a la robustez del diseño de la India Mark II y III, la bomba manual Afridev fue la primera bomba de pozo profundo cuya fabricación y mantenimiento podía ser realizado con éxito a nivel local y de la comunidad.

Se puede decir que la Afridev fue la primera consecuencia del proyecto “Rural Water Supply Handpumps Project” del Banco Mundial. Poco después de comenzar el proyecto se identificó la necesidad de desarrollar una bomba de pozo profundo que siguiera los conceptos VLDM ya que ninguna de las existentes en el mercado ofrecía resultados

satisfactorios. Es por lo tanto la primera bomba específicamente desarrollada bajo las premisas VLOM.



**Fig31. Primeros diseños de la Afridev (Reynolds, 1992)**

En 1987 se publicaron las primeras especificaciones técnicas cuyos principales elementos de diseño fueron:

- Diámetro reducido + carrera larga para reducir los esfuerzos.
- El pistón accesible desde la superficie
- La válvula de pie accesible desde la superficie con una herramienta especial para elevarla
- La palanca ajustable en longitud para poder trabajar siempre en la relación óptima de funcionamiento.
- Introducción de varillas de acero inoxidable, para mejorar la resistencia a la corrosión.
- Empleo de materiales plásticos
- En la medida de lo posible todos los subensamblajes serían intercambiables entre sí

En la figura 31 se observan dos modelos diferentes de Afridev, el de la izquierda fue el diseño original de la bomba mientras que el modelo de la derecha fue un desarrollo realizado por un fabricante privado que mejoraba ciertos aspectos que fueron incluidos en las especificaciones técnicas de la misma. Esas dos imágenes representan bien, como los desarrollos concretos, bien sean realizados por iniciativa privada o pública revierten positivamente sobre las bombas si se mantiene el dominio público de la tecnología.

Actualmente el desarrollo de nuevas especificaciones para enfrentarse a las carencias del diseño original ha sido realizado por la SKAT hasta la actualidad, fechándose la última revisión e incorporación de los avances producidos en el 2002.

### 3.2.2.1 Especificaciones técnicas

En este apartado únicamente se van a esbozar las características fundamentales de la bomba, para más información se pueden consultar las especificaciones técnicas de la SKAT, de dominio público “Afridev Handpump Specification. Revision 4-2002”

La bomba manual Afridev es una bomba manual de pozo profundo, de acción indirecta y simple efecto. El principio de funcionamiento de la misma es la elevación del agua mediante un pistón y un par de válvulas para controlar el flujo de agua.

#### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	50 mm
Carrera del pistón:	225 mm
Caudales aprox. (75W):	a 10 m      1,4 m <sup>3</sup> /h
	a 15 m      1,1 m <sup>3</sup> /h
	a 20 m      0,9 m <sup>3</sup> /h
	a 25 m      0,8 m <sup>3</sup> /h
	a 30 m      0,7 m <sup>3</sup> /h
Rango de profundidades:	10 – 45 m
Usuarios por bomba:	300 aprox.
Nivel de abastecimiento:	15 – 20 litros/persona día

#### Materiales:

• Cabeza de la bomba	acero galvanizado
• Palanca	acero galvanizado
• Cuerpo de la bomba	acero galvanizado
• Varilla	acero ó acero inoxidable
• Tuberías	PVC-U (d=63 mm)
• Cilindro del pistón	PVC-U
• Pistón	latón ó poliacetato
• Válvula de pie	latón ó poliacetato

Actualmente existen distintas configuraciones posibles (ver tabla 3.5 y figuras 32, 33, 34). Algunos de los diseños, más antiguos, se conservan únicamente para la fabricación de repuestos para las bombas existentes pero ya no esta recomendada su fabricación ya que las modificaciones realizadas mejoran el funcionamiento.

**Tabla 3.5.** Opciones disponibles. Bomba AFRIDEV. (SKAT, 2002)

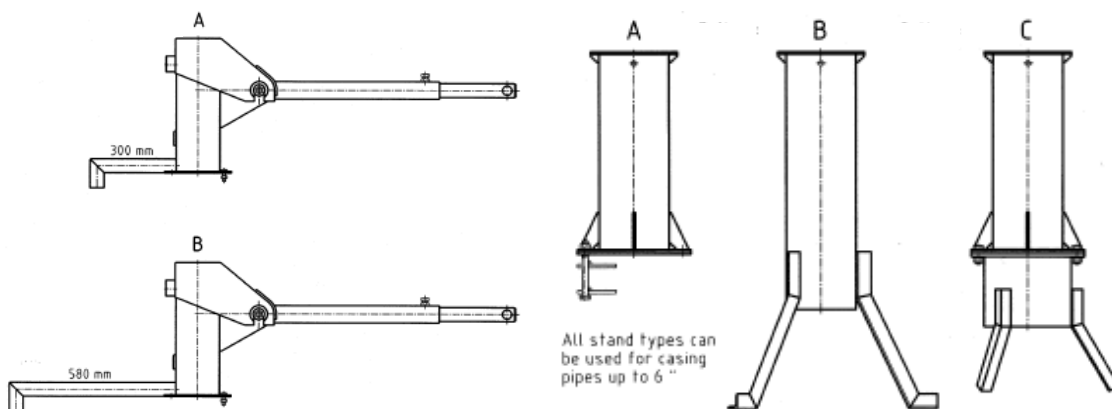
**Bomba manual Afridev**

Lista de opciones disponibles:

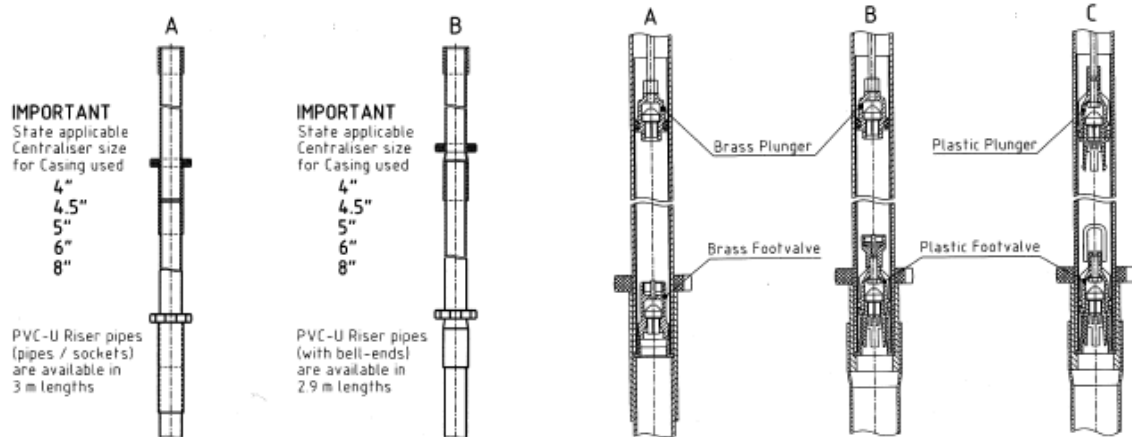
Opciones	A	B	C	D
<b>Cabeza de la bomba</b>	Cabeza estándar con caño corto: (30cm). Plano B2003	Cabeza estándar con caño largo: (58cm). Plano B2003	---	---
<b>Cuerpo de la bomba</b>	Cuerpo con sujeción inferior. Plano B2055	Cuerpo con 3 patas. Plano B2050	Cuerpo estándar ISO. Plano B2048	---
<b>Tubería de ascensión</b>	PVC-U con uniones tipo abrazadera. Plano A2119	PVC-U con uniones tipo campana. Plano A2099	---	---
<b>Pistón + Válvula de pie</b>	Pistón y válvula de pie de latón. Plano A2296	Pistón de latón y válvula de pie de plástico. Plano A2257	Pistón y válvula de pie de plástico. Plano A2070	---
<b>Varillas</b>	Varillas de acero con rosca. Plano A2206	Varillas de acero inox., con rosca. Plano A2209	Varillas de FRP con rosca de latón. Plano A5889	Varillas de acero inox. ojo & enganche. Plano A2110

- opción ya no recomendada
  - no recomendada cuando el pH es inferior a 6.5
- FRP: Plástico reforzado con fibras

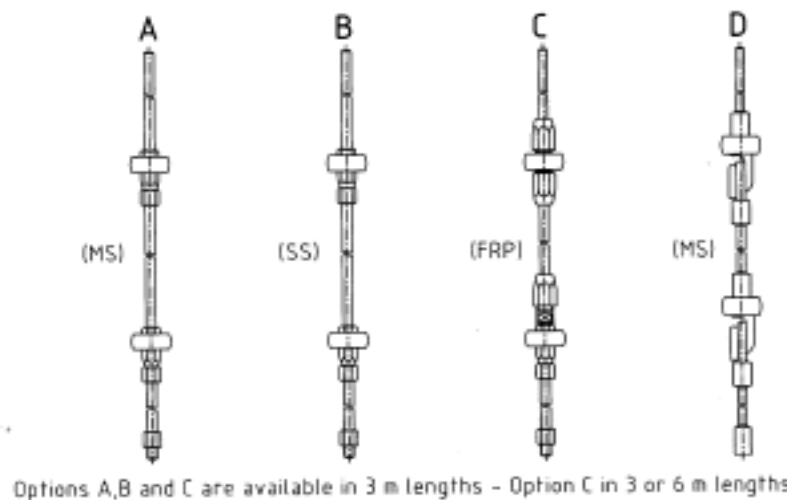
Para la elección de las opciones se siguieron las recomendaciones dadas por la SKAT, por lo que la configuración final de la bomba fue A-A-B-B-B.



**Fig32.** Cabeza y cuerpo de la bomba, opciones disponibles (SKAT, 2003)



**Fig33. Tuberías de ascensión, pistón y válvula de pie, opciones disponibles (SKAT, 2003)**



**Fig34. Varillas y conexiones, opciones disponibles (SKAT, 2003)**

A continuación se muestran planos técnicos representativos (Fig35, 36 y 37):

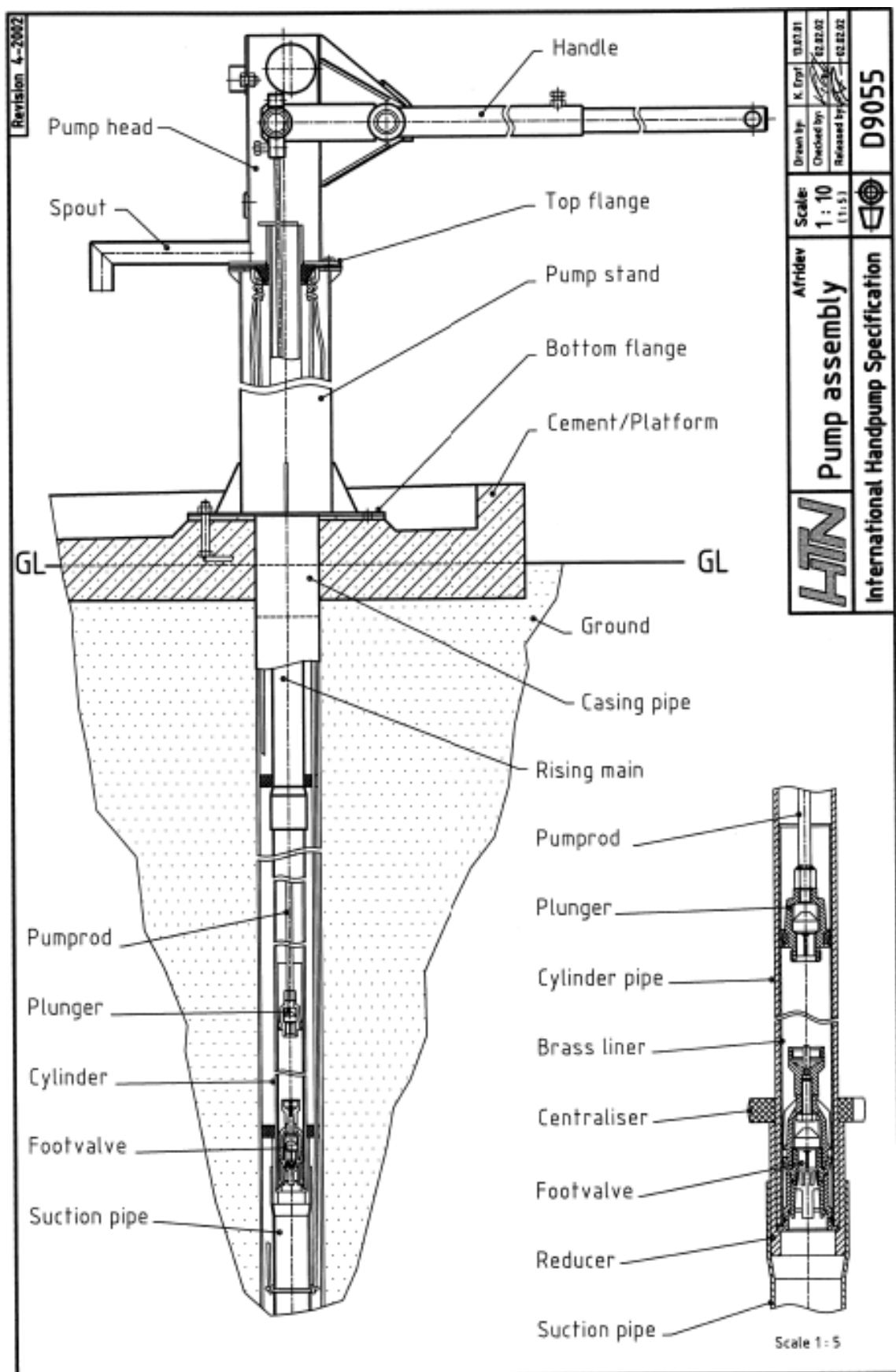


Fig35. Bomba Afridev ensamblada (SKAT, 2002)

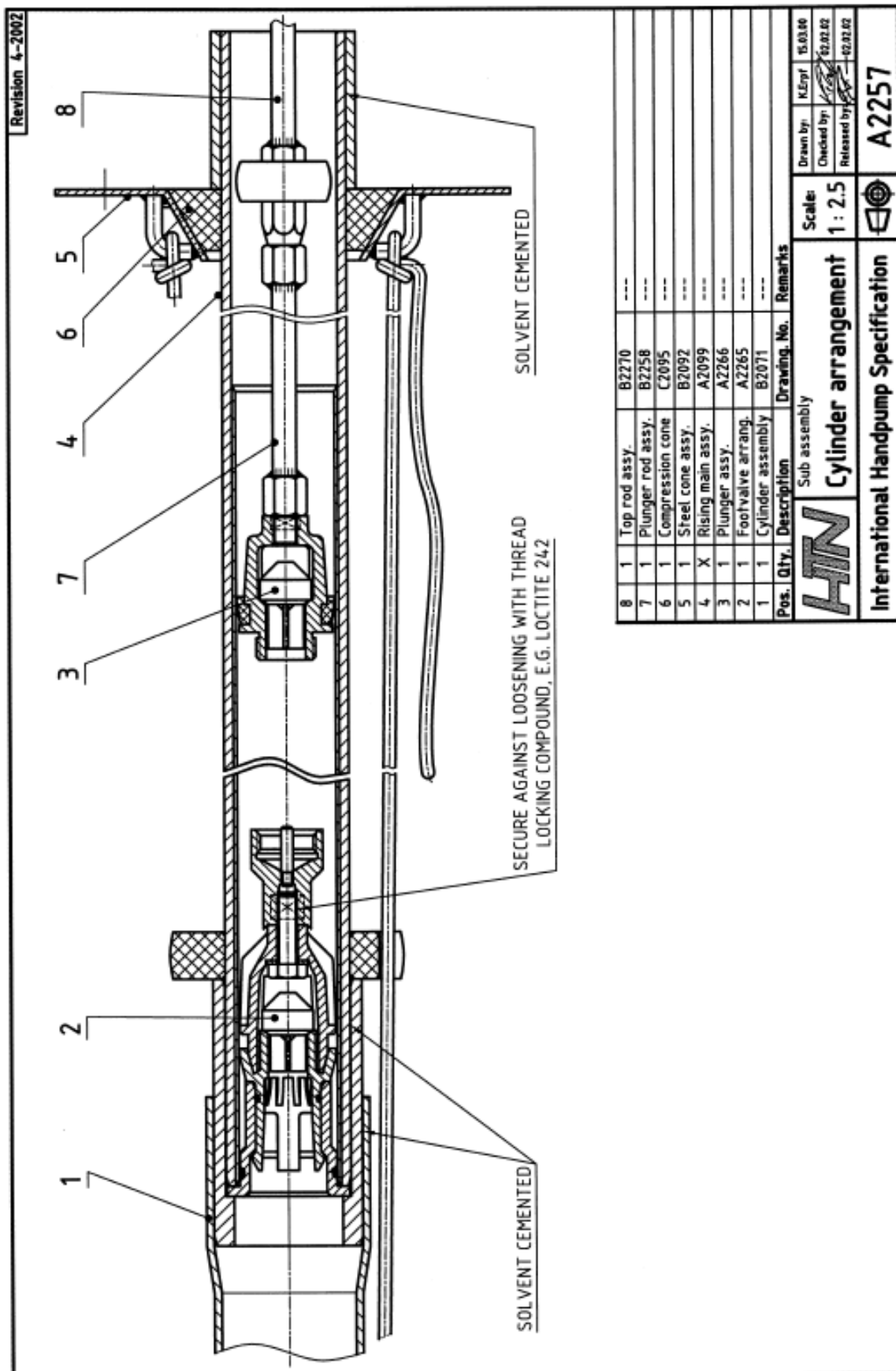


Fig36. Ensamblaje del cilindro (SKAT, 2002)



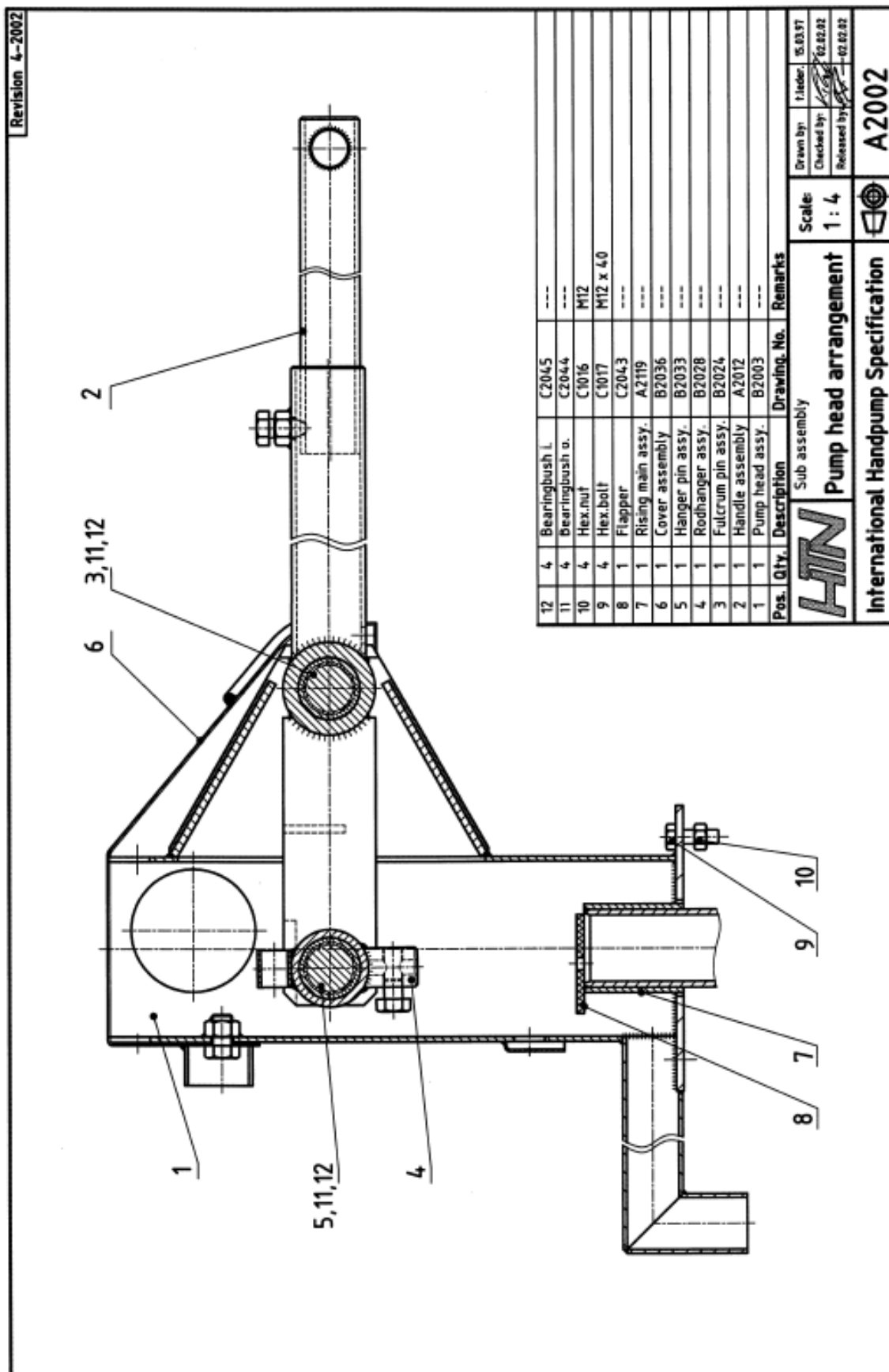


Fig37. Ensamblaje de la palanca (SKAT, 2002)

En el primer plano (Fig35) de la serie esta dibujada la bomba con el equipo para pozo perforado, en el caso del laboratorio se va a emplear pozo abierto (depósito) por lo que la tubería exterior y los centralizadores asociados son innecesarios. En cambio es previsible que se haga necesario un sistema de sujeción, también recomendado en el manual de instalación cuando la bomba se sitúa en pozo abierto.

El mantenimiento de la bomba puede ser realizada por una sola persona después de un pequeño entrenamiento, sólo en roturas de elementos bajo tierra puede necesitar ayuda para izar el pistón. Nunca, en cualquier caso se requiere de equipos especiales o personal técnico. Las especificaciones de mantenimiento de la bomba se realizarán más adelante junto con el de los equipos auxiliares instalados.

Junto con la documentación técnica también se adjuntan una serie de recomendaciones para la correcta colocación del pistón respecto del nivel de agua.

Para pozos perforados el fin de la tubería de succión (long=1000mm) debe estar como mínimo 6 metros por debajo del DWL. Para obtener el DWL propone dos métodos distintos:

- a) Usando el pozo en la estación seca: Utilizando la siguiente ecuación con los valores obtenidos

$$DWL = SWL + (Q_{hp} \cdot D) \div Q_{ty}$$

Siendo  $Q_{hp}$ = Caudal máximo bombeado (0,33 l/s para la Afridev)

$Q_{ty}$ = Caudal obtenido con la bomba en el pozo

D= Descenso del nivel del agua durante el experimento anterior

- b) Cuando el método anterior no sea posible el fin de la tubería de succión estará al menos 10m por debajo del SWL de la estación seca.

Para pozos escavados, en fin de la tubería de succión (long=300mm) estará al menos un metro por debajo del DWL en la estación seca (ver Fig38).

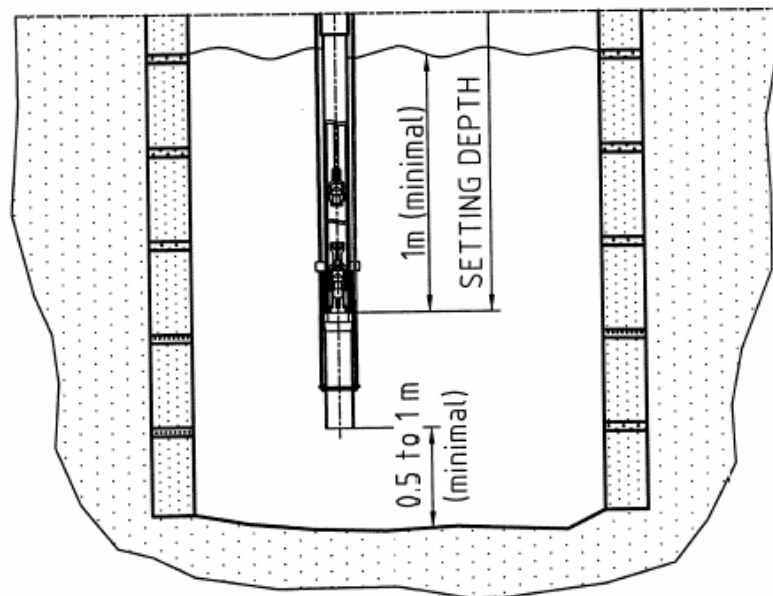


Fig38. Instalación de los elementos sumergidos (SKAT, 2002)

Al igual que sucedía con la Malda, en el laboratorio no será necesario dejar tanto espacio entre el fondo y la tubería de succión al no existir fondo arenoso. Se estima que con 100mm de espacio es suficiente para el correcto funcionamiento de la bomba

Observar que existe una divergencia entre el gráfico adjuntado en las especificaciones técnicas y el texto. Ya que éste último cuenta la distancia desde el fin de la tubería de succión y en el gráfico se empieza a contar desde la válvula de pie. En lo sucesivo se considerará el valor dado en el dibujo por ser más restrictivo.

### 3.2.2.2 Cálculos previos

Con los datos técnicos en la mano se pueden realizar una serie de cálculos teóricos que permitirán hacer una primera caracterización del funcionamiento de la bomba útil para el posterior diseño de los distintos elementos del laboratorio.

Conocido el diámetro del pistón ( $d$ ) y la carrera ( $l$ ) se obtiene el volumen bombeado por palada:

$$V = \pi \cdot (d/2)^2 \cdot l = 0,4417 \cdot \text{litros}$$

La frecuencia de aplicación en una bomba manual, por consideraciones ergométricas y de esfuerzo oscila entre 40-50 paladas minuto, considerándose un máximo de 80 paladas minuto para experimentación en el laboratorio (Reynolds, 1992) si se aplica un esfuerzo máximo, con estos dos valores, usando la frecuencia ( $f$ ), es fácil obtener los caudales teóricos de la bomba, expresados en la tabla 3.6.

$$Q = V \cdot f$$

**Tabla 3.6.** Caudales teóricos de la Afridev

Nº de paladas por minuto	Frecuencia (Hz)	Volumen (l/min)	Volumen (l/h)
20	0,33	8,84	530
30	0,50	13,25	795
40	0,67	17,67	1060
50	0,83	22,09	1325
60	1,00	26,51	1590
70	1,17	30,93	1856
80	1,33	35,34	2121

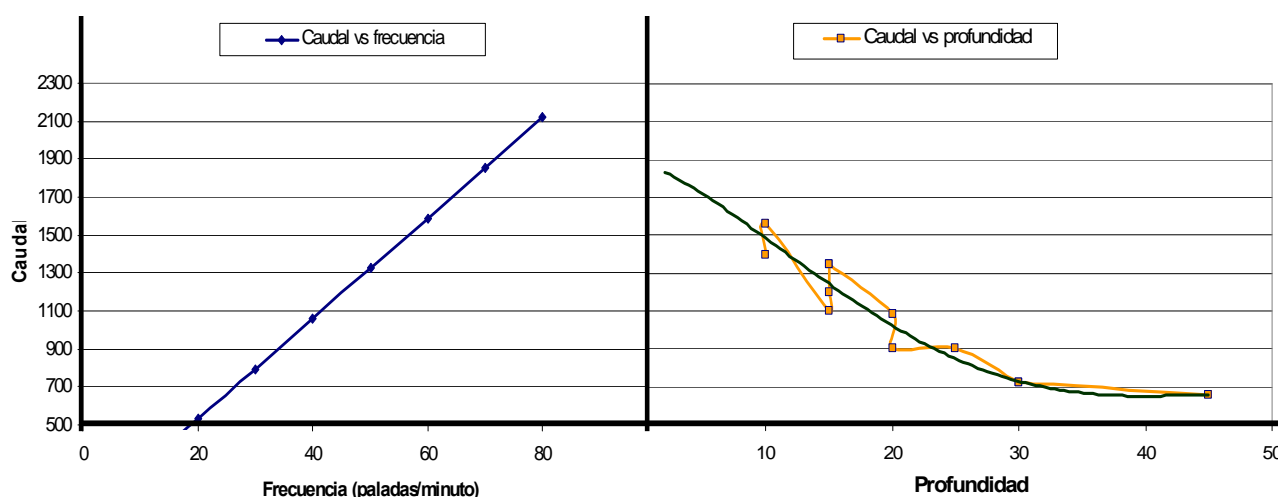
Apuntar que en estos caudales no esta considerado las posibles perdidas que pueda tener el pistón, aunque en cualquier caso en rendimiento volumétrico alcanza valores próximos al 98% (Reynolds, 1992), por lo que si dan una idea muy precisa del caudal obtenible aunque no del esfuerzo necesario.

Si se comparan estos valores teóricos con los valores de funcionamiento recabados en la tabla 3.7 se observa la similitud de caudales a las frecuencias normales de funcionamiento.

**Tabla 3.7.** Caudales experimentales de la Afridev

Altura de bombeo (m)	Caudal (l/min)	Caudal (l/h)	Potencia (W)	Rendimiento total	Fuente
10	23,3	1400	75		SKAT
10	26	1560			COWAP
15	18,3	1100	75		SKAT
15	20	1200			COWAP
15	22,5	1350			MEERA
15	22,5	1350			SKI
20	18	1080			COWAP
20	15	900	75	65,3	SKAT
25	15	900			COWAP
30	12	720			COWAP
30	12	720	75	78,4	SKAT
45	11	660	100	80,85	SKAT

En gráfico de la figura 39 se relacionan los tres parámetros que condicionan el funcionamiento de la bomba, el caudal, el esfuerzo aplicado y la profundidad de bombeo.



**Fig39.** Caudal vs frecuencia de bombeo y profundidad

Es de reseñar igualmente las diferencias entre los caudales anunciados por los fabricantes (MEERA, SKI) y los de otras organizaciones (SKAT, COWAP). Respecto a las bombas de pozo profundo hay cierta confusión a la hora de establecer una relación entre el caudal, el esfuerzo y la profundidad. Se encuentran textos que afirman que se puede bombear a más de 45m frente a otras fuentes que desaconsejan el empleo de estas bombas a tales profundidades. Será objeto de experimentación el determinar unos caudales reales de operación de la Afridev.

El esfuerzo es el factor fundamental en cualquier sistema de bombeo manual, y es la capacidad de esfuerzo del ser humano la que determinará la fuerza y la frecuencia con la cual maneja la Afridev. Así pues si unimos el hombre, la profundidad y las características de la bomba (peso de la varilla, peso del pistón, rozamiento entre pistón y forro de fricción...) se puede calcular, para una potencia aplicada, la frecuencia, el caudal obtenido,

la fuerza realizada, y así tener una orientación sobre la longitud óptima de la palanca dentro de las opciones posibles.

Para el cálculo del esfuerzo realizado se han obtenido las siguientes características de la Afridev:

### **Peso de la varilla:**

Material:	Acero inoxidable, ISO 15510 X5CrNi 18-9
Densidad:	7960 kg/m <sup>3</sup>
Sección:	0,000113 m <sup>2</sup>
Peso =	0,9 kg/m

### **Peso del pistón:**

Material:	Latón ISO 426-2 CuZn38Pb4
Densidad:	8400 kg/m <sup>3</sup>
Volumen:	4,46 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Peso =	0,4 kg

### **Peso del agua**

Densidad:	1000 kg/m <sup>3</sup>
Sección:	0,00196 m <sup>2</sup>
Peso:	1,963 kg/m

Entonces la fuerza necesaria para mover el pistón en la carrera de subida es:

$$F(h) = (g \cdot h \cdot P_{\text{varilla}} + g \cdot P_{\text{Pistón}}) + g \cdot h \cdot P_{\text{agua}}$$

En la carrera de bajada este efecto es muy inferior y para simplificar el proceso de cálculo se ha considerado que en ningún caso superará el 20% de la fuerza de bombeo en la carrera ascendente. Esto puede hacerse debido a que en la carrera de bajada el peso del pistón y la varilla favorecen el movimiento mientras que el agua contenida en las tuberías no se desplaza y solamente dificulta el paso de fluido a través de la válvula del pistón. En este margen de seguridad también considera la parte del esfuerzo que se pierde en deformaciones de las piezas. Así la fuerza total aplicada es la suma de ambas.

$$F_{\text{aplicada}} = 1,2 \cdot (F_{\text{bombeo}})$$

**Tabla 3.8.** Fuerza aplicada al bombeo

Profundidad	*en la carrera de subida		**en ambas carreras		% efecto peso varilla
	Fuerza* por peso del agua (kN)	Fuerza* por peso de la varilla (kN)	Fuerza total considerando varilla cte (kN)	Fuerza total aplicada (kN)	
3	57,73	30,39	105,74	105,74	0,0%
4	76,97	39,21	128,83	139,41	7,6%
5	96,21	48,03	151,92	173,09	12,2%
6	115,45	56,85	175,01	206,77	15,4%
7	134,70	65,68	198,10	240,45	17,6%
8	153,94	74,50	221,19	274,13	19,3%
9	173,18	83,32	244,28	307,80	20,6%
10	192,42	92,14	267,37	341,48	21,7%
11	211,66	100,97	290,46	375,16	22,6%
12	230,91	109,79	313,55	408,84	23,3%
13	250,15	118,61	336,64	442,51	23,9%
14	269,39	127,43	359,73	476,19	24,5%
15	288,63	136,26	382,83	509,87	24,9%
16	307,88	145,08	405,92	543,55	25,3%
17	327,12	153,90	429,01	577,22	25,7%
18	346,36	162,72	452,10	610,90	26,0%
19	365,60	171,55	475,19	644,58	26,3%
20	384,85	180,37	498,28	678,26	26,5%
21	404,09	189,19	521,37	711,94	26,8%
22	423,33	198,01	544,46	745,61	27,0%
23	442,57	206,84	567,55	779,29	27,2%
24	461,81	215,66	590,64	812,97	27,3%
25	481,06	224,48	613,73	846,65	27,5%
26	500,30	233,30	636,82	880,32	27,7%
27	519,54	242,13	659,91	914,00	27,8%
28	538,78	250,95	683,00	947,68	27,9%
29	558,03	259,77	706,10	981,36	28,0%
30	577,27	268,59	729,19	1015,04	28,2%
31	596,51	277,42	752,28	1048,71	28,3%
32	615,75	286,24	775,37	1082,39	28,4%
33	634,99	295,06	798,46	1116,07	28,5%
34	654,24	303,88	821,55	1149,75	28,5%
35	673,48	312,71	844,64	1183,42	28,6%
36	692,72	321,53	867,73	1217,10	28,7%
37	711,96	330,35	890,82	1250,78	28,8%
38	731,21	339,17	913,91	1284,46	28,8%
39	750,45	348,00	937,00	1318,13	28,9%
40	769,69	356,82	960,09	1351,81	29,0%
41	788,93	365,64	983,18	1385,49	29,0%
42	808,17	374,46	1006,27	1419,17	29,1%
43	827,42	383,29	1029,37	1452,85	29,1%
44	846,66	392,11	1052,46	1486,52	29,2%
45	865,90	400,93	1075,55	1520,20	29,2%
46	885,14	409,75	1098,64	1553,88	29,3%
47	904,39	418,58	1121,73	1587,56	29,3%
48	923,63	427,40	1144,82	1621,23	29,4%

49	942,87	436,22	1167,91	1654,91	29,4%
50	962,11	445,04	1191,00	1688,59	29,5%
51	981,36	453,87	1214,09	1722,27	29,5%
52	1000,60	462,69	1237,18	1755,94	29,5%
53	1019,84	471,51	1260,27	1789,62	29,6%
54	1039,08	480,33	1283,36	1823,30	29,6%
55	1058,32	489,16	1306,45	1856,98	29,6%
56	1077,57	497,98	1329,54	1890,66	29,7%
57	1096,81	506,80	1352,64	1924,33	29,7%
58	1116,05	515,62	1375,73	1958,01	29,7%
59	1135,29	524,45	1398,82	1991,69	29,8%
60	1154,54	533,27	1421,91	2025,37	29,8%
61	1173,78	542,09	1445,00	2059,04	29,8%
62	1193,02	550,91	1468,09	2092,72	29,8%
63	1212,26	559,74	1491,18	2126,40	29,9%
64	1231,50	568,56	1514,27	2160,08	29,9%
65	1250,75	577,38	1537,36	2193,75	29,9%

De la tabla 3.8 se extraen dos conclusiones importantes. La primera es que a partir de los 15 metros de profundidad la fuerza a aplicar adquiere un valor considerable y aconseja el uso de mecanismos que reduzcan la fuerza a aplicar. La segunda es la importancia del peso de la varilla dentro del balance total de fuerzas. En un futuro sería interesante comprobar las prestaciones de las varillas de plástico disponibles, aunque éstas son más difíciles de obtener en países en desarrollo y quizás por eso la opción recomendada sea la de varillas de acero inoxidable.

La Afridev cuenta con una palanca extensible que permite modificar el par de fuerza aplicado en función de la fuerza o gustos del usuario. Así, con la geometría de la palanca y las ecuaciones de la estática se halla la fuerza real que se debe aplicar en el pistón para que se produzca bombeo.

$$\sum M_{eje} = 0 = F_{aplicada} \cdot l_a + F_{bombeo} \cdot l_b$$

siendo  $l_a$  la distancia entre el eje y la varilla, y  $l_b$  la distancia entre el eje y el punto de aplicación de la fuerza. De esta ecuación se despeja:

$$F_{bombeo} = \frac{F_{aplicada} \cdot l_a}{l_b}$$

$l_a$  es un valor constante e igual a 225 mm,  $l_b$  es varia, su valor mínimo es 640 mm, existiendo posiciones cada 50 mm hasta un máximo de 1150 mm. El ángulo de giro de la palanca es de 60°, lo cual, por consideraciones trigonométricas, implica que la distancia al eje es igual a la carrera en cualquier punto de la palanca. En esta ecuación la  $F_{aplicada}$  es un valor constante, función únicamente de la profundidad de bombeo.

Con estos valores y la frecuencia de aplicación se halla el esfuerzo realizado para bombear o subir el agua.

$$W = F_{bombeo} \cdot f \cdot carrera$$

En la tabla 3.9 se ve claramente como para un esfuerzo similar las distintas posiciones de la palanca permiten encontrar una relación óptima entre la fuerza realizada y la frecuencia de aplicación de la misma.

**Tabla 3.9.** Esfuerzos aplicados al bombeo en la Afridev

Profundidad (m)	Fuerza bombeo (kN)	Carrera (mm)	Paladas minuto / Frecuencia									
			15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
			0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00
15	179,25	640	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	297,65	640	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	416,05	640	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	534,45	640	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	652,84	640	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	771,24	640	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	168,71	680	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	280,14	680	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	391,57	680	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	503,01	680	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	614,44	680	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	725,87	680	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	159,33	720	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	264,58	720	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	369,82	720	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	475,06	720	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	580,31	720	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	685,55	720	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	150,95	760	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	250,65	760	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	350,36	760	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	450,06	760	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	549,76	760	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	649,47	760	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	143,40	800	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	238,12	800	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	332,84	800	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	427,56	800	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	522,27	800	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	616,99	800	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	136,57	840	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	226,78	840	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	316,99	840	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	407,20	840	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	497,40	840	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	587,61	840	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	128,90	890	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	214,04	890	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	299,18	890	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3



45	384,32	890	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	469,46	890	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	554,60	890	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	123,36	930	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	204,83	930	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	286,31	930	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	367,79	930	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	449,27	930	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	530,75	930	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	118,27	970	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	196,39	970	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	274,51	970	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	352,62	970	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	430,74	970	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	508,86	970	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	103,35	1110	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	171,62	1110	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	239,88	1110	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	308,15	1110	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	376,41	1110	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	444,68	1110	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
15	99,76	1150	28,7	38,2	47,8	57,4	66,9	76,5	86,0	95,6	105,2	114,7
25	165,65	1150	47,6	63,5	79,4	95,2	111,1	127,0	142,9	158,7	174,6	190,5
35	231,54	1150	66,6	88,8	110,9	133,1	155,3	177,5	199,7	221,9	244,1	266,3
45	297,43	1150	85,5	114,0	142,5	171,0	199,5	228,0	256,5	285,0	313,5	342,0
55	363,32	1150	104,5	139,3	174,1	208,9	243,7	278,5	313,4	348,2	383,0	417,8
65	429,21	1150	123,4	164,5	205,7	246,8	287,9	329,1	370,2	411,3	452,5	493,6
<b>Caudal (l/min)=</b>			6,63	8,84	11,04	13,25	15,46	17,67	19,88	22,09	24,30	26,51
<b>Caudal (l/h)=</b>			397,6	530,1	662,6	795,2	927,7	1060	1193	1325	1458	1590

Como se vio en el primer capítulo el esfuerzo aplicable por una persona en una bomba manual oscilaba entre 100W para una persona joven en buen estado de salud y 40W para una niña pequeña. En la tabla se observa como el hecho de contar con una palanca extensible es una buena solución ergonómica ya que permite al usuario operar la misma de acuerdo a sus gustos. Por ejemplo un niño escogerá largos recorridos para aprovechar su elasticidad en el recorrido de la palanca compensando su falta de fuerza mientras que una persona adulta preferirá un movimiento más corto aunque implique mayor fuerza. Por otro lado los valores resultantes de caudal respecto al esfuerzo invitan a pensar que las hipótesis realizadas son en exceso conservadoras. Como se aprecia en la figura 40 que representa una curva de esfuerzo obtenida en el laboratorio de evaluación de bombas manuales del Banco Mundial la fuerza aplicada es negativa en partes del recorrido. La experimentación en el laboratorio permitirá aclarar conceptos en ese sentido y permitir un conocimiento más aproximado de lo que sucede durante el bombeo.

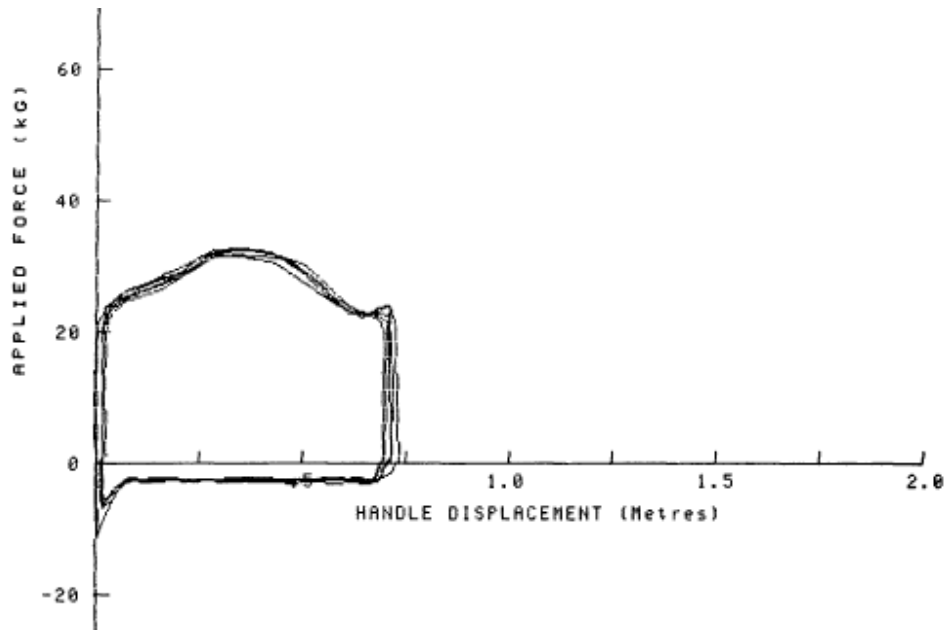


Fig40. Desplazamiento de la palanca vs fuerza aplicada para la bomba Nira AF76 (BM, 1983)

En la figura siguiente se muestra un gráfico representativo de los caudales de bombeo en la zona habitual de trabajo de la bomba.

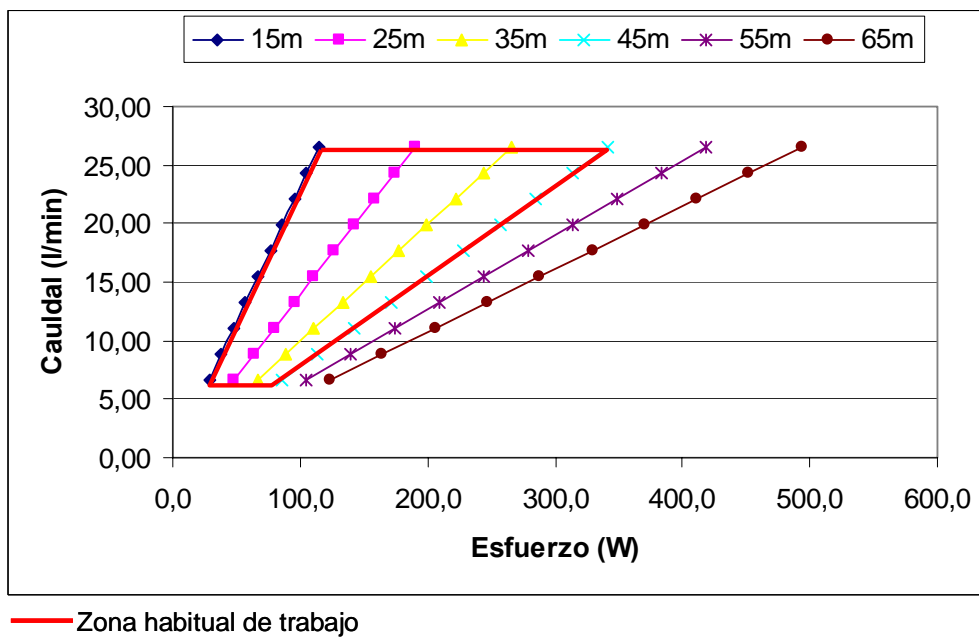


Fig41. Caudal vs Esfuerzo. AFRIDEV

En el gráfico anterior se puede ver de una manera mucho más intuitiva la relación entre el esfuerzo y el caudal de agua. Se observa que para profundidades superiores a 45m la relación entre caudal y esfuerzo se dispara.

### 3.2.3 Bomba de Mecate

La bomba de mecate, que se ha desarrollado fundamentalmente en Nicaragua, ha generado un gran interés debido a su bajo costo, su alto rendimiento, su durabilidad y sus reducidas necesidades de mantenimiento. La bomba se basa en un diseño milenario de bomba de cuerda que ha sido renovado a lo largo de las últimas décadas (Fig42). Adecuada para ser usada a nivel comunitario o familiar, la bomba tiene un funcionamiento similar al de otras bombas más caras, como por ejemplo la Afridev y la India Mark II, a profundidades de aguas subterráneas de hasta 50 metros (Alberts H. 2000).

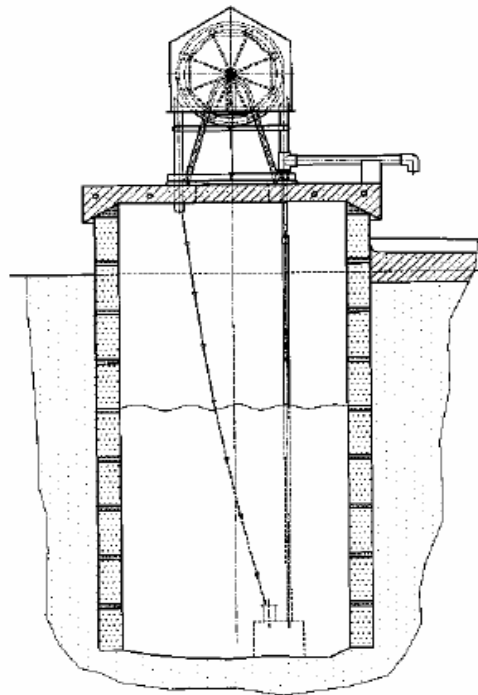


Fig42. Bomba de mecate (Ropepump.org)

Uno de los puntos claves para la rápida difusión de la bomba de mecate en Nicaragua y en los países que la han ido adoptando ha sido su bajo costo, sumado a su confiabilidad y al poco mantenimiento que necesita. Un estudio realizado por el Banco Mundial en 1995 concluyó que el costo anual de mantenimiento de la bomba de mecate nunca superaba los \$10. En comparación, el costo de mantenimiento anual de las bombas en la India (predominantemente las bombas India Mark II) están en el rango de \$59 a \$107. El costo de instalación de la bomba de mecate también es significativamente menor que el de las bombas Afridev o India Mark II.

El precio de adquisición de la bomba de mecate medio ronda los \$150 variando en función de la profundidad y el país de adquisición. En cambio para la Afridev el precio no sería menor a \$175. Estos cálculos se hacen siempre que se presuponga una producción a nivel local ya que la importación y explotación de bombas manuales aumente considerablemente los costes.

A día de hoy son muchos los países en desarrollo, que han adoptado el concepto de diseño de la bomba de mecate originario de Nicaragua y como consecuencia son múltiples las adaptaciones que ha sufrido la bomba según la aplicación y el país donde se ha fabricado. En colaboración de la SKAT, el gobierno de Madagascar adoptó y desarrolló el concepto de la bomba de mecate produciéndose las primeras especificaciones técnicas detalladas de

la bomba. Hay que tener en cuenta que estas especificaciones están adaptadas a la problemática y capacidad tecnológica de Madagascar.

En general puede decirse que la bomba de mecate es una tecnología muy competitiva respecto a las bombas de pistón convencionales. Su coste de adquisición, mantenimiento son bajos y los requerimientos tecnológicos para su fabricación mínimos. La SKAT identifica como principal problemática de la bomba mecate su diseño poco robusto lo cual la descartan para su empleo en comunidades de más de 70 usuarios.

Es intención del trabajo que se está realizando en la Universidad el desarrollo tecnológico completo de una bomba de mecate analizando críticamente desde un enfoque de tecnología apropiada y de acuerdo a los conceptos VLOM todos los componentes y procesos de fabricación implicados en la bomba de mecate. Esta labor está más allá del alcance de este trabajo y se espera que se culmine con la instalación de la bomba fabricada en el espacio habilitado al efecto en el banco de ensayos del laboratorio.

### 3.2.3.1 Especificaciones técnicas

En este apartado únicamente se van a esbozar las características fundamentales de la bomba, para más información se pueden consultar las especificaciones técnicas de la SKAT, de dominio público “Madagascar Rope Pump Specifications”, o al fabricante nicaragüense BOMESA S.A. principal impulsor de la bomba de mecate.

El principio de funcionamiento de la bomba de mecate se ve bien representado en las siguientes figuras (Fig43 y 44):

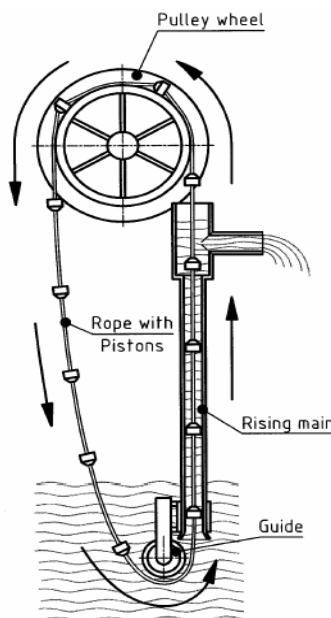


Fig43. Esquema de funcionamiento de la bomba de mecate (SKAT, 2005)

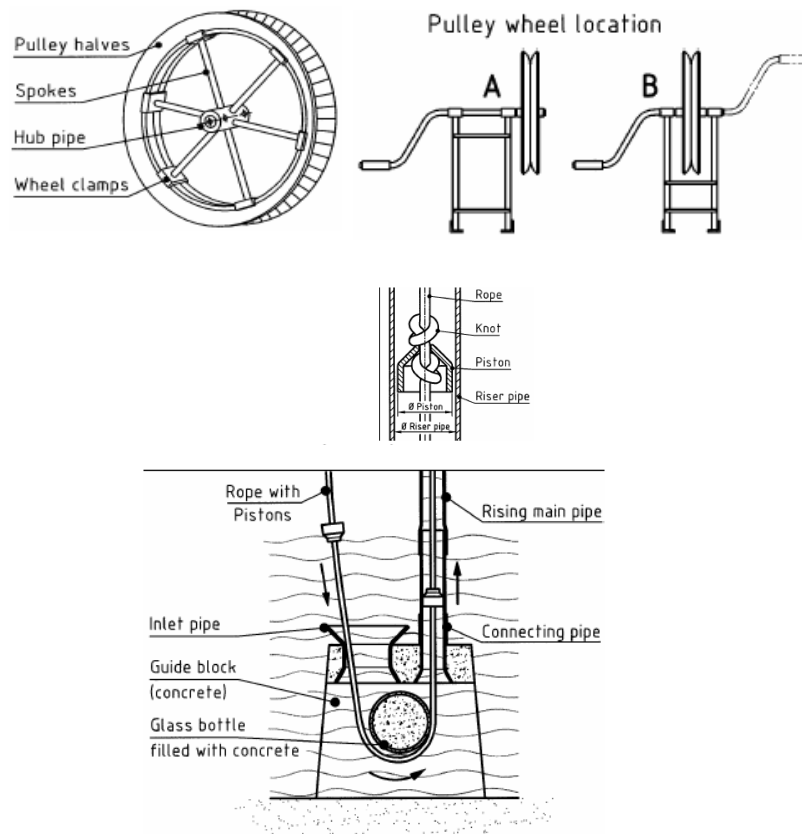


Fig44. Elementos principales de la bomba de mecate (SKAT, 2005)

### Datos técnicos:

Diámetro del pistón:	1", 3/4", 1/2" (Varía según profundidad)	
Carrera del pistón:	Funcionamiento rotatorio	
Caudales aprox. (75W):	a 10 m	1,4 m <sup>3</sup> /h
	a 15 m	1,1 m <sup>3</sup> /h
	a 30 m	0,7 m <sup>3</sup> /h
Rango de profundidades:	0 – 50 m	
Usuarios por bomba:	Varían según lo robusto del diseño	
Nivel de abastecimiento:	15 – 40 litros/persona día	

### Materiales:

• Cuerpo de la bomba	acero recubierto
• Palanca	acero
• Rueda:	acero, materiales reciclados
• Tuberías	PVC-U
• Pistón	plástico
• Guía:	cerámicos, PVC

En líneas generales se puede decir que la bomba de mecate es una tecnología indicada para grupos de usuarios pequeños, con un rango de profundidades muy amplio si se varía el diámetro de la tubería de ascensión. Su diseño hace que sea mucho más sencilla su instalación en pozos excavados o de diámetro elevado.

A continuación se muestran planos de detalle de la bomba de mecate de Madagascar elaborados por la SKAT (Fig45, 46 y 47):

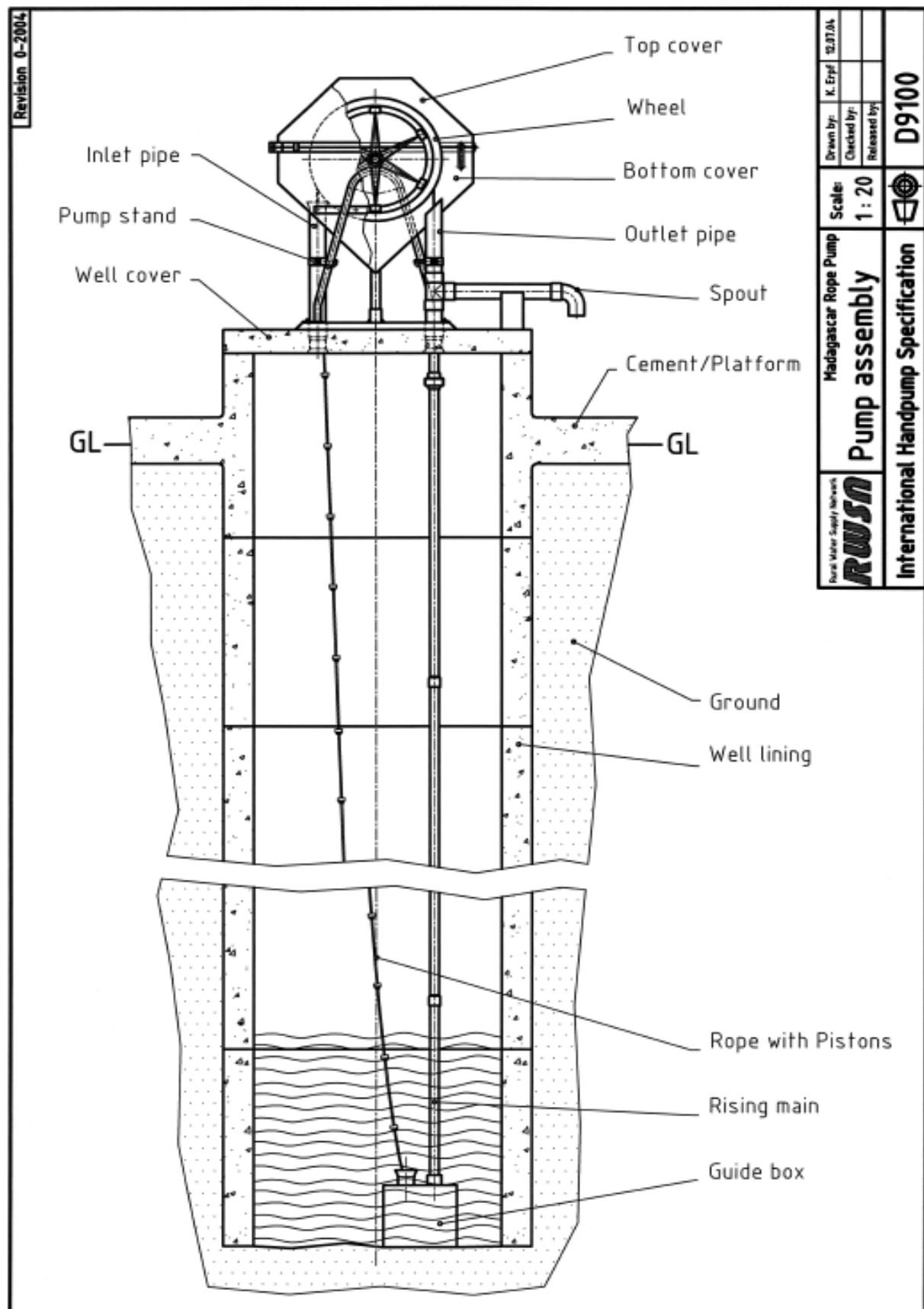


Fig45. Bomba de mecate Madagascar ensamblada (SKAT, 2004)



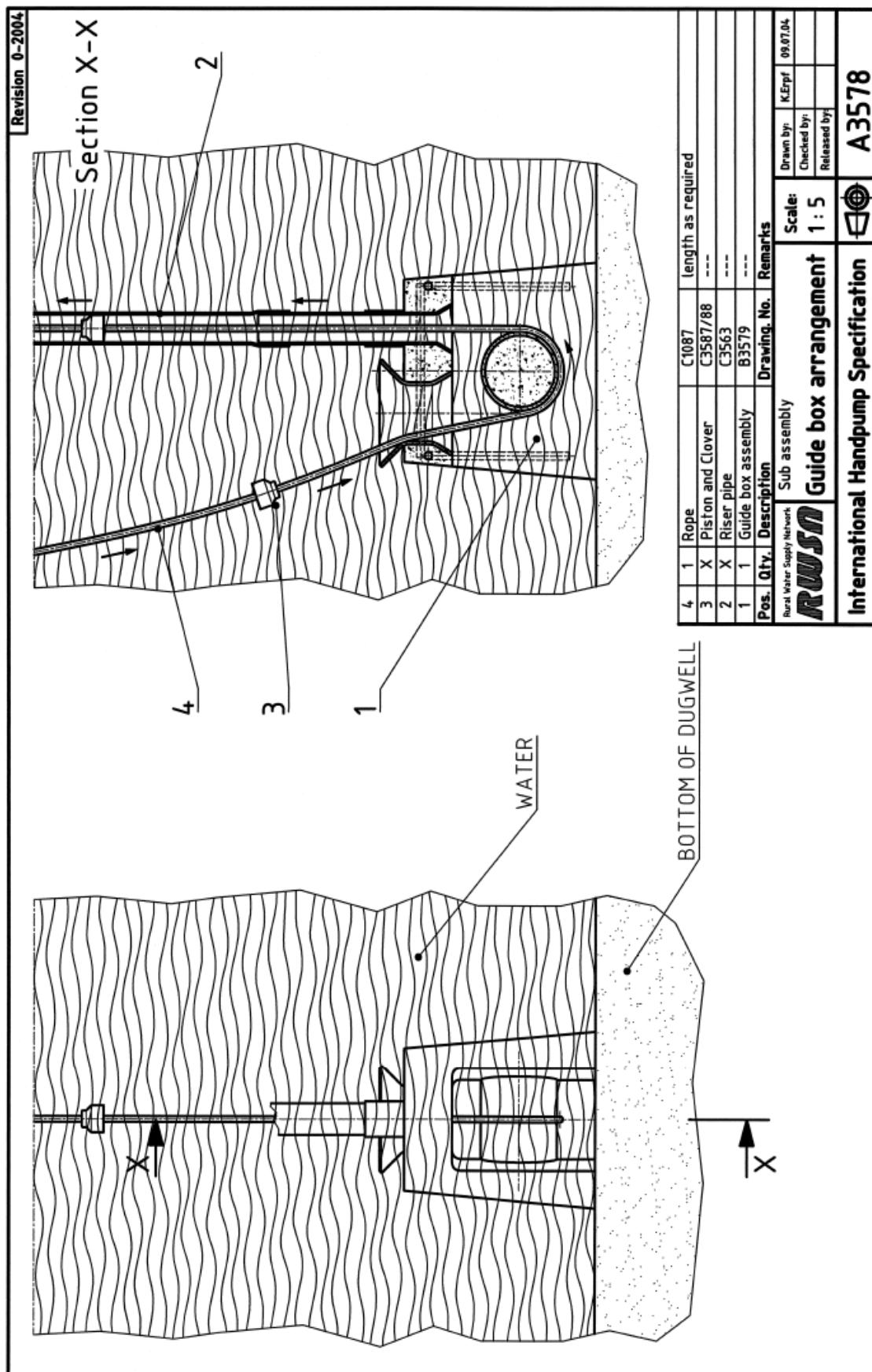


Fig47. Elementos subterráneos (SKAT, 2004)



### 3.3 Banco de Ensayos

Una vez definidas las características principales de las bombas a instalar se procede al diseño del banco de ensayos. Este incluye la estructura necesaria para la disposición de los equipos, los sistemas necesarios para cambiar las condiciones de operación y la instrumentación y monitorización del funcionamiento de las bombas.

Habrán partes comunes a los tres puestos de trabajo, partes comunes únicamente a las bombas de pistón y partes singulares a cada puesto de trabajo.

Dentro del banco de ensayos se incluyen los siguientes elementos

- Depósitos de agua: De los que bombear y a los que recircular el agua bombeada
- Plataforma: Común a los tres equipos, con la altura libre al suelo suficiente para situar los elementos subterráneos
- Sistema de retorno de agua: Para recoger y devolver al depósito principal el agua bombeada.
- Sistema de simulación de profundidad.

#### 3.3.1 Plataforma

La plataforma elevada se diseña con unas dimensiones mínimas (largo, ancho) necesarias para la instalación y operación en los tres puestos de trabajo. Una ampliación de la misma permitiría recoger otros experimentos futuros que surjan durante el trabajo en el banco de ensayos.

A efectos de dimensionado se considera:

- Dimensiones de referencia de la bomba de mecate tomadas de “Madagascar Rope Pump Specification”, RWSN - SKAT 2004.
- Los puestos destinados a bombas de pistón son aptos para bombas de acción directa y de palanca. Se toma la Afridev como modelo de referencia por ser de mayor tamaño que las bombas de menor profundidad y tener unas dimensiones estándar dentro de las bombas de pozo profundo.

Sobre la plataforma hay 3 puestos de trabajo con los siguientes usos:

- **Puesto 1:** Tendrá capacidad para albergar y operar bombas manuales de cualquier tipo a excepción de bombas de mecate. Para ello contará con un agujero de dimensión no inferior a 125 mm con sujeciones para fijar la posición de la tubería de ascensión, un sistema de soporte para la bomba con la altura recomendada para una operación ergométrica y el espacio necesario para operar y manipular la bomba. En este espacio se montará la Malda.
- **Puesto 2:** Tendrá capacidad para albergar bombas manuales de cualquier tipo a excepción de bombas de mecate. Para ello contará con un agujero de dimensión no inferior a 125mm, con sujeciones para fijar la tubería de ascensión, un sistema de

soporte para la bomba con la altura recomendada para la operación ergométrica de la misma, espacio necesario para operar y manipular la bomba y un sistema de control de la altura de bombeo. En este puesto se instalará la Afridev.

- **Puesto 3:** Tendrá capacidad para albergar bombas de mecate. Para ello contará con dos agujeros separados 540 mm, de diámetro superior a 100mm, con sujeciones para la tubería de ascensión y para el retorno de la cuerda, un sistema para agarrar el soporte de la bomba y el espacio suficiente para operar y manipular la misma. En la medida de lo posible la separación de los agujeros será flexible

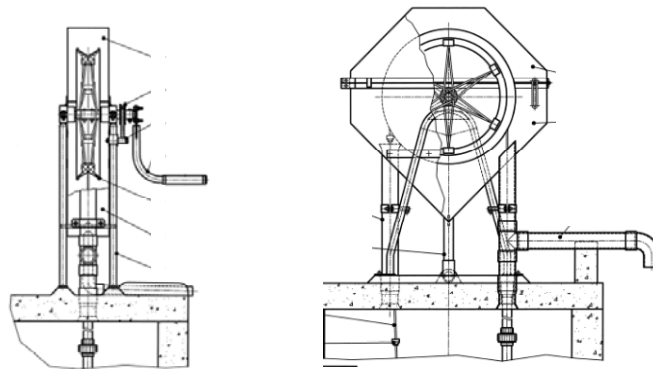
Las dimensiones en planta de los elementos de referencia son las siguientes:

- Afridev: Figura 48. Largo 1800 mm; Ancho 400 mm



**Fig48. Vista aérea bomba Afridev**

- Mecate: Largo: Figura 49. Largo: 1200 mm; Ancho: 720 mm. Valores orientativos a falta de un estudio detallado.



**Fig49. Vistas de la bomba de Mecate Madagascar (SKAT, 2004)**

Aparte de los elementos mencionados, sobre la plataforma debe existir espacio suficiente para operar las bombas, guardar las herramientas, documentación, aparatos de medida necesarios y realizar la toma de datos; además de zonas libres para poder desplazarse cómodamente de un puesto a otro,...

La distribución óptima está reflejada en la figura 50.

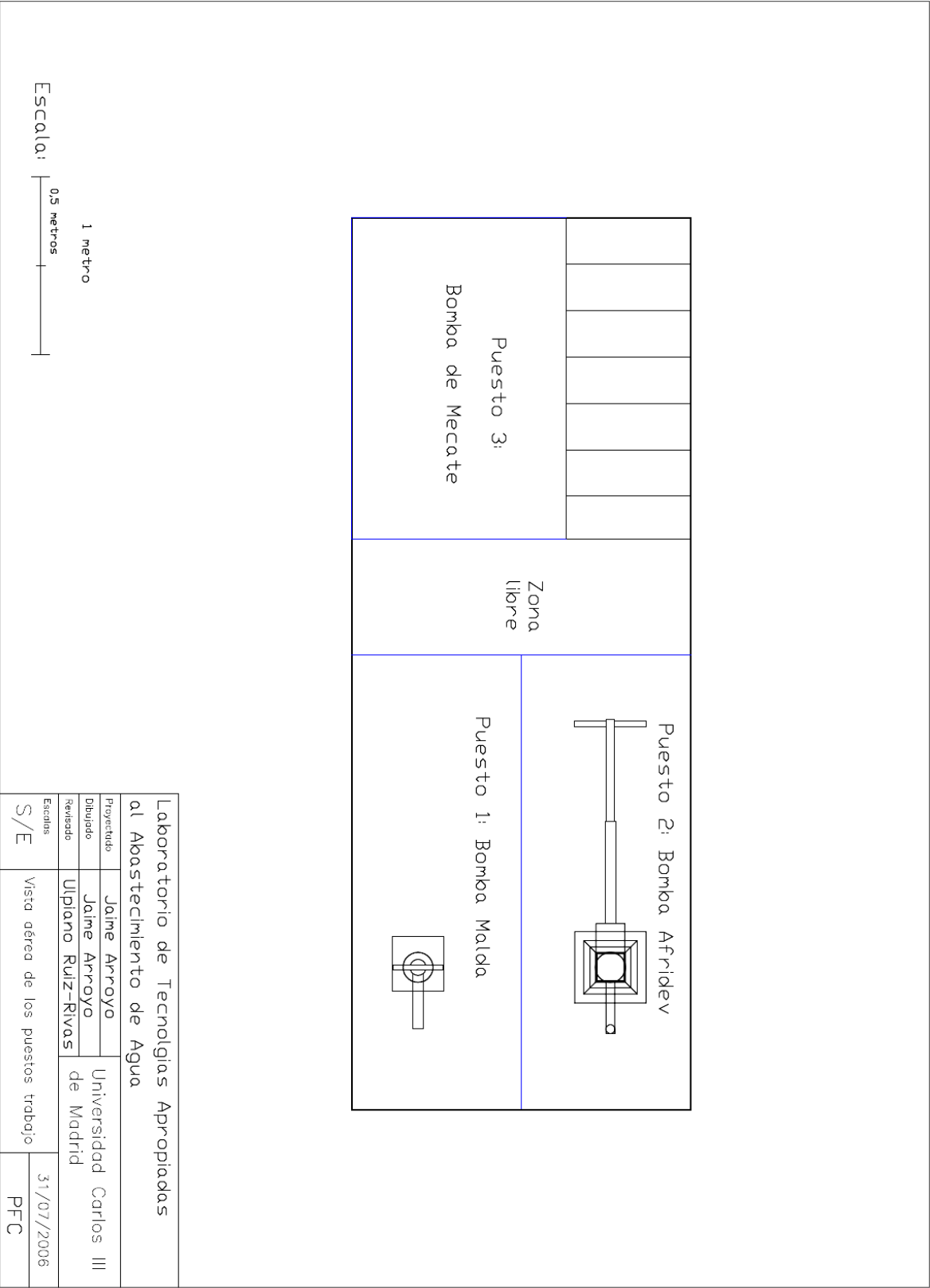


Fig50. Vista aérea de los puestos de trabajo

Por lo que las dimensiones mínimas de la plataforma, en planta, son 5000 x 1900 mm.

En cuanto a los requisitos de altura libre, el espacio habilitado por la universidad para la ubicación del laboratorio tiene las siguientes características:

- Altura libre entre el suelo y el techo: 4,70 metros en su punto más bajo.
- Superficie libre: 56 m<sup>2</sup> (8 x 7 metros), en los que irán incluidos además del banco de ensayo de bombas manuales el resto de elementos del laboratorio de tecnologías apropiadas al abastecimiento de agua.

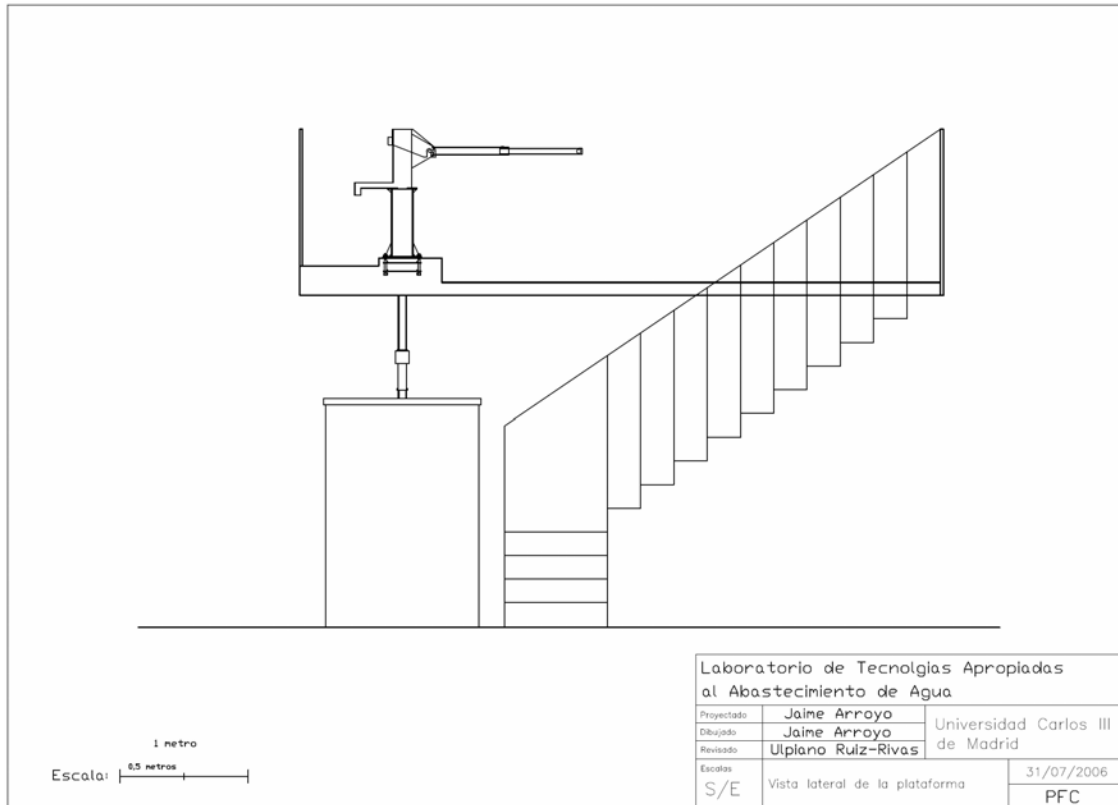
En total se dejan dos metros hábiles entre la plataforma y el techo quedando un espacio libre de 2,70m para la instalación de los componentes subterráneos. Valor que se considera más que suficiente.

Aparte, para asegurar una correcta fijación de las bombas a la plataforma se prevén unas cimentaciones, estas tendrán la altura y dimensiones necesarias para una correcta instalación de las bombas y las cubetas de cada una. En el caso de la Afridev la altura recomendada de la cimentación son 19cm y para la Malda 13cm.

### 3.3.2 Depósitos de agua

Para instalar de manera adecuada los elementos subterráneos es necesaria la colocación de unos depósitos de agua con las dimensiones suficientes para simular las condiciones de un pozo real. Como se vio anteriormente existen dos tipos distintos de pozo, el excavado, de mayor diámetro y el perforado.

Tanto para facilitar el acceso y visión de los componentes como por su disponibilidad en el mercado se escoge la opción de instalar uno, o varios depósitos cilíndricos (según tamaño) que hacen las veces de pozo excavado. El factor crítico será la altura del mismo ya que un nivel insuficiente de agua sobre la válvula de pie o sobre la guía (bombas de mecate) impediría un correcto funcionamiento de la bomba.



**Fig51. Vista lateral de la plataforma**

### 3.3.2.1 Afridev

Los componentes sumergidos de la Afridev, como se especificó anteriormente, presentan las siguientes características:

- Altura mínima entre el fondo y la tubería de succión: 30 cm para pozos abiertos. Antes se menciona la posibilidad de reducir este espacio a 10cm, pero a la espera de conocer la altura definitiva de la plataforma podría ser interesante dejar 30cm y plantear la posibilidad de simular fondos arenosos en el depósito.
- Longitud de la tubería de succión, 30 cm.
- Altura mínima entre el nivel del agua (PWL) y la válvula de pie, 100 cm.

Por lo tanto la altura mínima de nivel de agua que deberá contener el depósito es 140 - 160 cm. Dejando un margen para evitar desbordamientos la altura ideal del depósito que contenga el pistón de la Afridev varía entre 150cm y 180cm. Un valor superior no es recomendable para, así facilitar la visión directa del pistón.

Para evitar fluctuaciones apreciables en el nivel de agua y teniendo en cuenta que el sistema funciona en circuito cerrado será de al menos 1000 litros (1 hora de funcionamiento) prefiriéndose volúmenes superiores.

### 3.3.2.2 Malda

Los componentes sumergidos de la Malda, como se especifico anteriormente, presentan las siguientes características:

- Altura mínima entre el fondo y la tubería de succión, 30 cm para pozos abiertos. Antes se menciona la posibilidad de reducir este espacio a 10cm, pero a la espera de conocer la altura definitiva de la plataforma podría ser interesante dejar 30cm y plantear la posibilidad de simular fondos arenosos en el depósito.
- Longitud de la tubería de succión, 30cm
- Altura mínima entre el nivel del agua y la válvula de pie, 100 cm

Por lo tanto la altura mínima de nivel de agua que deberá contener el depósito es 140 – 160 cm. Dejando un margen para evitar desbordamientos la altura ideal del depósito que contenga el pistón de la Afridev varía entre 150cm y 180cm. El límite superior no es recomendable que sea mayor para facilitar la visión directa del pistón.

Para evitar fluctuaciones apreciables en el nivel de agua y teniendo en cuenta que el sistema funciona en circuito cerrado será de al menos 1000 litros (1 hora de funcionamiento) prefiriéndose volúmenes superiores.

### 3.3.2.3 Bomba de mecate

El diseño de este elemento esta fuera del alcance de este proyecto.

### 3.3.2.4 Selección de equipos

La altura de agua sobre el pistón para obtener unas condiciones de operación adecuadas es igual para ambas bombas de pistón lo que abre la posibilidad de emplear un solo depósito en el laboratorio en el cual se sitúen ambos pistones.

El depósito o depósitos adquiridos para situar los émbolos de bombeo deberán tener, en la medida de lo posible una entrada para el retorno de agua y una calibración de volumen para poder detectar pérdidas en el sistema y variaciones en el nivel de agua durante la operación. Elementos que sino deberán ser añadidos antes de su instalación en el laboratorio

Una vez consultados diversos proveedores, el depósito para situar los pistones encontrado que mejor cumple con las necesidades es el suministrado por AIQSA (Auxiliar de Instalaciones Químicas S.A.), ya que debido a sus características sólo es necesario instalar un depósito.

- Características del depósito: Tipo A. Equipo incluido: 1 tubuladora (63mm). Equipo opcional: Indicadores de nivel

Capacidad: 2000 litros

Diámetro: 1200 mm

Altura: 1791 mm

Material: Poliéster reforzado con fibra de vidrio. Calidad agua potable,

### 3.3.3 Sistema de retorno de agua

Obviamente toda el agua bombeada sobre la plataforma debe ser conducida de nuevo al depósito formando un sistema cerrado. El sistema de retorno de agua esta compuesto de unas cubetas para recoger el agua bombeada, tuberías para conducirla de vuelta al depósito y accesorios para ensamblar todo el conjunto. Las características de los elementos que componen el sistema son las siguientes:

- Cubetas: El ancho y el largo esta limitado por las dimensiones de la plataforma no pudiendo ser superiores a 600 x 900 mm. El alto esta condicionado por la altura del caño, superior a 400mm según bomba. El volumen total de la cubeta no es un factor importante aunque sería preferible capacidades superiores a 100 litros para posibles experimentos (test de descarga...)
- Tuberías: Para no variar la lista de materiales distintos presentes en el laboratorio las tuberías instaladas serán de PVC PN 16 de diámetro 63mm idénticas a las de la Afridev.
- Accesorios: Codos, uniones, tes... para las tuberías del mismo material y características.

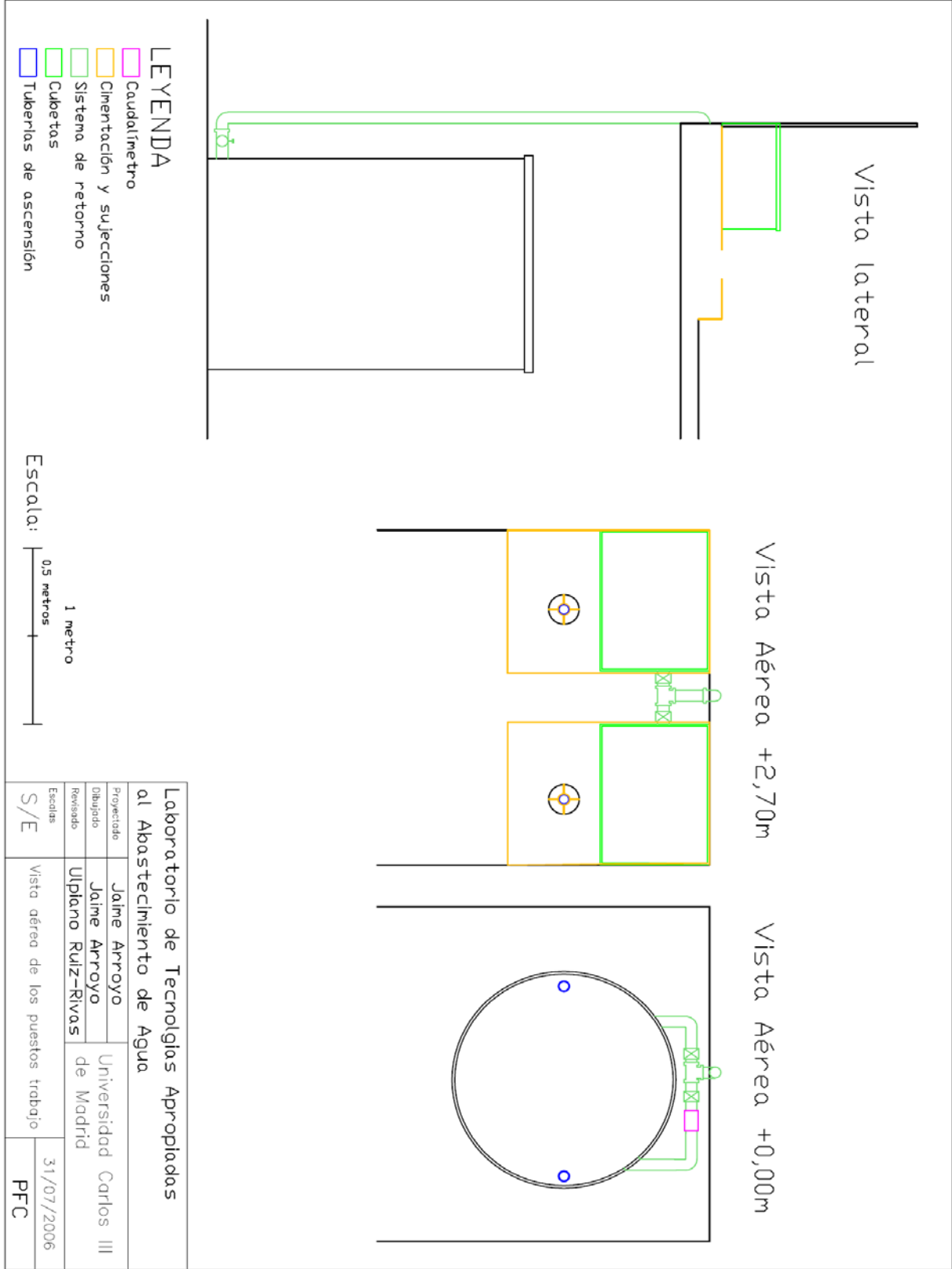


Fig52. Sistema de retorno de agua



### 3.3.3.1 Selección de equipos

Para la recogida de agua en la plataforma no se selecciona equipo alguno hasta que no se conozcan las dimensiones definitivas de la plataforma (superficie útil, anclaje de las bombas). De las fuentes consultadas se recomienda cualquiera de las opciones ofertadas por Resopal, por ejemplo:

- Características de la cubeta: Cubeta cerrada, con una tubuladura a realizar (63mm).

Capacidad: 120 litros

Dimensiones: 800 x 600 mm

Altura: 320 mm

Material: Calidad alimentaría. Polietileno

### 3.3.4 Sistema de simulación de profundidad

El puesto 2 de trabajo esta diseñado para trabajar con bombas de pozo profundo cuyo rango de acción oscila entre los 15-45m. Por lo tanto habrá que habilitar un sistema de simulación de profundidad para poder hacer funcionar la bomba en las condiciones para las que ha sido diseñada.

Aunque el diseño ira referido al equipo de bombeo escogido, Afridev, la similitud en las características de la tubería de ascensión, las varillas y el mecanismo de aplicación de fuerza hacen que el sistema sea extrapolable, con ligeras modificaciones, a cualquier bomba (de domino público) de pistón de pozo profundo existente en el mercado (India Mark II y III, Bush, Volanta, U3M)

La profundidad de operación se traduce, a efectos prácticos, en una variación de los metros de columna de agua existentes sobre el pistón y en un aumento del peso de las varillas por aumentar el número de ellas. Para ello se dividirá el sistema de simulación en dos partes, la primera dedicada para presurizar el pistón y una segunda para contabilizar y reproducir el efecto del peso de la varilla mediante unas pesas convenientemente situadas.

Para presurizar el cilindro donde se sitúa el pistón la opción más sencilla es la instalación de un embolo independientemente del método de accionamiento, pero debido a la presencia de la varilla para acometer esta solución habrá que desviar previamente el flujo de agua.

Para controlar el efecto del embolo se consideraron las siguientes opciones:

- **Mediante pesas o muelle de fuerza constante.** En un principio se consideró esta opción por ser la más sencilla e intuitiva de manejar. Pero se comprobó que el volumen y masa de las pesas era demasiado grande para resultar manejable y de igual modo no se encontró ningún muelle de fuerza constante que cumpliera con las exigencias de la instalación.
- **Mediante una válvula de seguridad adaptada.** El principio de funcionamiento de las válvulas de seguridad es el de un embolo junto a un muelle convenientemente tarado, de manera que regule la presión máxima del circuito.

Debido a la existencia en el mercado de una serie de válvulas de seguridad para controlar la sobrepresión se consideró esta opción como la más sencilla.

- **Presurizar mediante aire comprimido.** La existencia de una red de aire comprimido en la Universidad Carlos III de Madrid hizo plantear la posibilidad de presurizar el sistema de esta forma. El hecho de no contar con una toma cercana de la red hizo descartar esta opción y dejarla como opción de reserva si ninguna de las anteriores resultaba factible.

El cálculo del peso a añadir a la bomba para completar las condiciones de simulación por metro de profundidad es sencillo. Las complicaciones en este caso vendrán dadas por encontrar una localización idónea de las pesas que disponga del espacio para albergarlas.

### 3.3.4.1 Válvula de seguridad adaptada

La presurización mediante una válvula de seguridad convencional se considera la opción más adecuada para las características del sistema, por ser una solución sencilla que permite acondicionar el sistema rápida y fácilmente para la simulación a distintas profundidades.

El proceso de selección de la válvula se ha hecho de acuerdo a la “NTP 342: Válvulas de seguridad: características” y a la “NTP 510: Válvulas de seguridad: selección” del Centro Nacional de Condiciones de Trabajo. Las válvulas de seguridad tienen una serie de valores de diseño que condicionan su funcionamiento y que será de vital importancia seleccionar de manera adecuada.

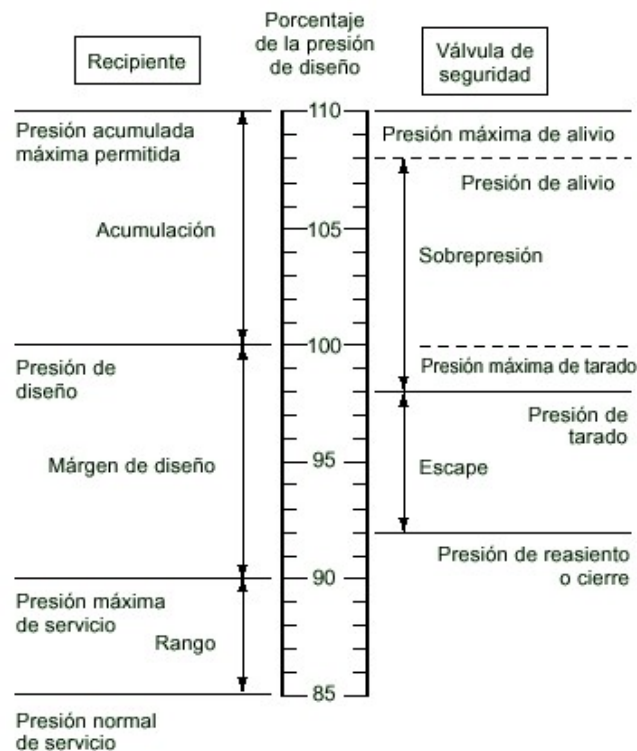


Fig53. Régimen de presiones para una válvula de seguridad con sobrepresión del 10% (NTU 510)

En el laboratorio la válvula de seguridad se verá sometida a unas condiciones particulares de uso y los parámetros de diseño adquirirán una significación distinta a la que tienen en una aplicación convencional. Concretamente:

- La presión de diseño se corresponde con una profundidad de funcionamiento (apertura de la válvula) y debe ser regulable de manera que, fácilmente, se pueda variar este valor para la simulación a distintas profundidades con una misma válvula.
- La presión normal de servicio, máxima de servicio y el margen de diseño son valores que carecen de sentido en el funcionamiento de la válvula
- La sobrepresión debe ser lo más pequeña posible.

La presión varía en líquidos según la profundidad de acuerdo a:

$$P = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

Hay que tener en cuenta que la válvula no estará situada a la misma profundidad que el pistón sino, 1340 mm (aprox.) por encima del pistón lo cual variará levemente a las presiones existentes a cada uno como se aprecia en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10.** Variación de la presión entre el pistón y la válvula

Profundidad (m)	En el pistón		En la válvula		
	Presión (Pa)	Presión (bar)	Profundidad equivalente	Presión (Pa)	Presión (bar)
10	199.325	1,99	9,35	192.935,4	1,93
15	248.325	2,48	14,35	241.935,4	2,42
20	297.325	2,97	19,35	290.935,4	2,91
25	346.325	3,46	24,35	339.935,4	3,40
30	395.325	3,95	29,35	388.935,4	3,89
35	444.325	4,44	34,35	437.935,4	4,38
40	493.325	4,93	39,35	486.935,4	4,87
45	542.325	5,42	44,35	535.935,4	5,36
50	591.325	5,91	49,35	584.935,4	5,85
55	640.325	6,40	54,35	633.935,4	6,34
60	689.325	6,89	59,35	682.935,4	6,83
65	738.325	7,38	64,35	731.935,4	7,32

Así pues, obtenemos que el rango de operación normal de la válvula oscila entre 1,9 bar y 5,36 bar pudiéndose llegar a 7,32 bar o más si se experimenta a profundidades fuera del rango de diseño (15m – 45m)

El siguiente valor a determinar es el caudal máximo, en las peores condiciones posibles, de funcionamiento de la válvula. Hay que tener en cuenta que el bombeo de agua solo se produce en la carrera ascendente del pistón por lo que la válvula deberá evacuar todo ese caudal únicamente en esa carrera por lo que los caudales de funcionamiento de la válvula el doble de los de la Afridev. (Tabla 3.11)

**Tabla 3.11.** Caudales de diseño de la válvula de seguridad

Nº de paladas por minuto	Caudal de bombeo (l/min)	Caudal de bombeo (l/h)	Caudal en la válvula en (l/min)	Caudal en la válvula en (l/h)
15	6,63	397,6	13,25	795,2
20	8,84	530,1	17,67	1060,3
30	13,25	795,2	26,51	1590,4
40	17,67	1060,3	35,34	2120,6
50	22,09	1325,4	44,18	2650,7
60	26,51	1590,4	53,01	3180,9
70	30,93	1855,5	61,85	3711,0
80	35,34	2120,6	70,69	4241,2

De igual modo la válvula debe satisfacer los siguientes requisitos:

- Resistencia a la corrosión. La Afridev es una bomba manual que presenta una excelente resistencia a la corrosión debido a que las varillas son de acero inoxidable. La válvula adquirida deberá por lo menos tener las mismas propiedades anticorrosión que la bomba siendo preferible una mayor resistencia para permitir experimentación con aguas contaminadas y/o agresivas.
- Fiabilidad. Al contrario que en las condiciones normales de operación la válvula estará sometida a continuas sobrepresiones lo que requerirá que la misma tenga un diseño robusto y fiable. Se preferirá un accionamiento mecánico a un automatismo.

Otro factor importante es que en un principio la válvula va a trabajar a contra presión, es decir, aguas abajo existirá una presión debida a que una vez superada la válvula el agua asciende por la tubería hasta el caño por donde descarga. El valor de esta presión es 1,16025 bares.

Resumiendo, la válvula deberá tener las siguientes propiedades:

Fluido de trabajo:	Agua
Temperatura de utilización:	0°C – 60°C
Presión máxima:	7,32 bar $\approx$ 8 bar (margen de seguridad)
Sobrepresión de tarado:	La mínima posible. En válvulas convencionales, con líquido de trabajo agua este valor es del 10%. Para sobrepresión menor hay que recurrir a equipos especiales.
Contrapresión máxima:	1,2 bar

#### **3.3.4.1.1 Selección y experimentación de equipos**

La aplicación a la que va a estar sometida la válvula no es aquella para la que ha sido diseñada por lo que previamente a su instalación en el banco de ensayos se realizará una evaluación sobre la idoneidad o no de la válvula de seguridad seleccionada.

Tras una exploración del mercado se selecciona la válvula con las siguientes características:

### Modelo: Art. 3190 Válvula de Seguridad a Escuadra

Fluido de trabajo:	Vapor, Agua, Aire, Gas
Temperatura de utilización:	-10°C – 220°C
Presión máxima:	16 bar PN16
Coef. de forma K:	0,05
Sobrepresión de tarado:	10% de la presión regulada
Contrapresión máxima:	1,13 bar
Diámetro seleccionado:	1" (ref. 3190 06)
Dimensiones:	L= 46 mm; H= 136 mm
Peso:	1000 g
Caudal máximo:	>7297 kg/h de agua

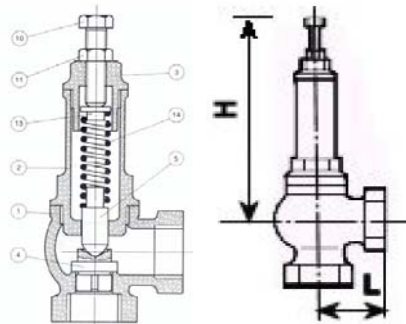


Fig54. Válvula de seguridad Art. 3190 (Genebre S.L.)

La ventaja principal de esta válvula es que se regula fácilmente mediante un tornillo habilitado al efecto y su principal inconveniente es que la contra presión máxima admisible es insuficiente para los requerimientos de la instalación. Pero mediante unas ligeras modificaciones se puede adaptar a su funcionamiento a contrapresión, convirtiendo la válvula en apta, a priori, para su uso en el laboratorio.

Para certificar el funcionamiento de la válvula se realizó una sencilla instalación en los laboratorios de la universidad. En una primera experimentación se certificó que el diseño original de la válvula no admite su funcionamiento a contrapresión y se acometieron las correcciones necesarias para que soportara la contrapresión existente en el banco de ensayos.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la válvula, se procedió, mediante una sencilla toma de medidas, a obtener una serie de datos representativos (tabla 3.12) de la válvula. Se tomó como origen de valores una posición fija de la tuerca cerca del punto donde comenzaba a presionar (tarar) el muelle. Una vez tomado este primer valor se tomó una medida cada cuarto de giro hasta el límite de presión disponible en la red de agua de la universidad (4 bar)

**Tabla 3.12.** Medidas experimentales de la válvula de seguridad Art. 3190

	Presión (bar)	Tiempo (s)	Volumen recogido (l)	Caudal (l/min)	Caudal real (l/min)
Pos 1	1,475	120	0,91	0,45	7,70
	1,5	46	1,00	1,30	22,2
	1,51	43,4	1,00	1,38	23,5
	1,55	35	1,00	1,71	29,2
	1,625	22,0	1,00	2,73	46,4
	1,7	20,5	1,00	2,93	49,8
Pos 2	1,9	120	0,98	0,49	8,30
	2	72	1,00	0,83	14,2
	2,075	31,9	1,00	1,88	32,0
	2,2	20,2	1,00	2,98	50,6
	2,3	17,4	1,00	3,45	58,7
	2,35	16,1	1,00	3,73	63,5
Pos 3	2,325	120	0,78	0,39	6,59
	2,41	102	1,00	0,59	10,0
	2,5	28,4	1,00	2,11	35,9
	2,6	15,5	1,00	3,87	65,9
Pos 4	2,6	120	0,92	0,46	7,78
	2,725	88,3	1,00	0,68	11,6
	2,9	34,4	1,00	1,74	29,7
	3	20,9	1,00	2,87	48,8
	3,1	17,6	1,00	3,40	57,9
Pos 5	3,4	118	1,00	0,51	8,66
	3,5	54,6	1,00	1,10	18,7
	3,6	29,9	1,00	2,01	34,1
	3,65	18,2	1,00	3,31	56,3
Pos 6	3,8	90,3	1,00	0,66	11,3
	3,9	44,4	1,00	1,35	23,0
	4	30,5	1,00	1,97	33,5
	4,1	18,9	1,00	3,17	53,9

En esta tabla se presentan los valores de presión y caudal de operación de la válvula, para presiones inferiores a las referidas la válvula presentaba ratios de descarga despreciables y no han sido incluidos. Se utilizan líneas de tendencia mediante métodos gráficos (Fig55) para caracterizar el funcionamiento de la válvula.

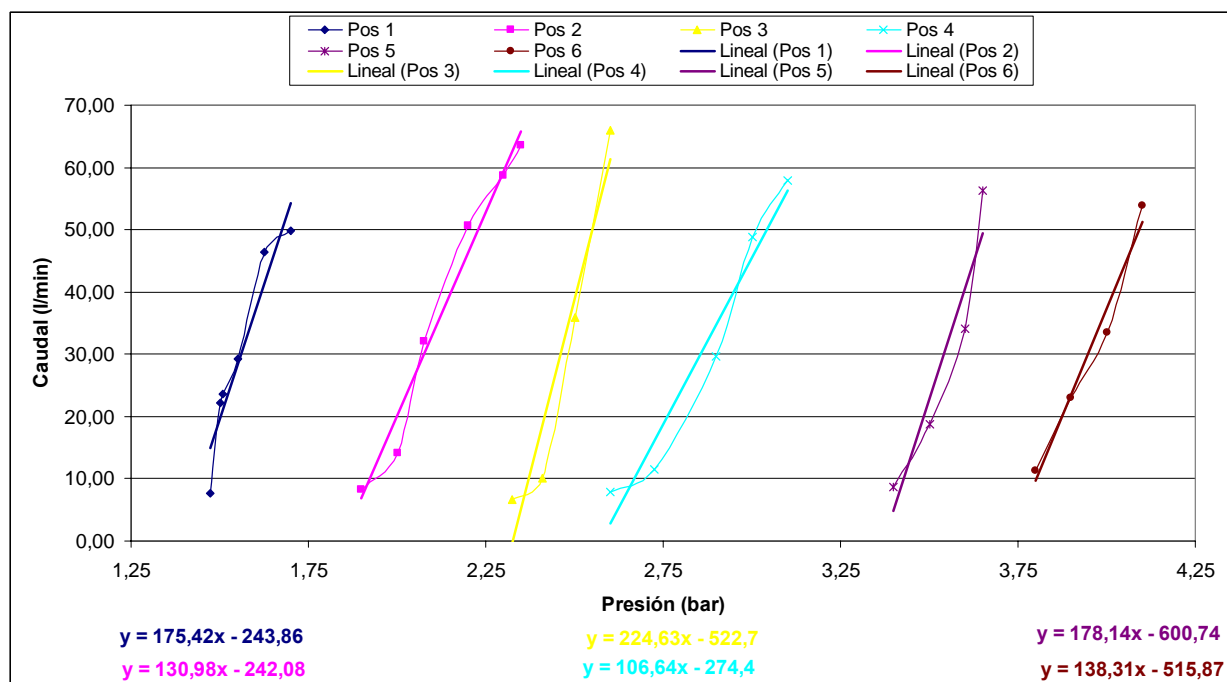


Fig55. Valores experimentales de la válvula Art. 3190

Se observa claramente en el gráfico como la curva de apertura es prácticamente vertical. Si se desarrolla a partir de las líneas de tendencia se puede estimar la presión de apertura, (equivalente a la presión de diseño en las válvulas de seguridad convencionales), y la presión normal de funcionamiento; y a partir de éstas estimar el error cometido en la simulación (tabla 3.13).

Tabla 3.13. Cálculo del error en la simulación

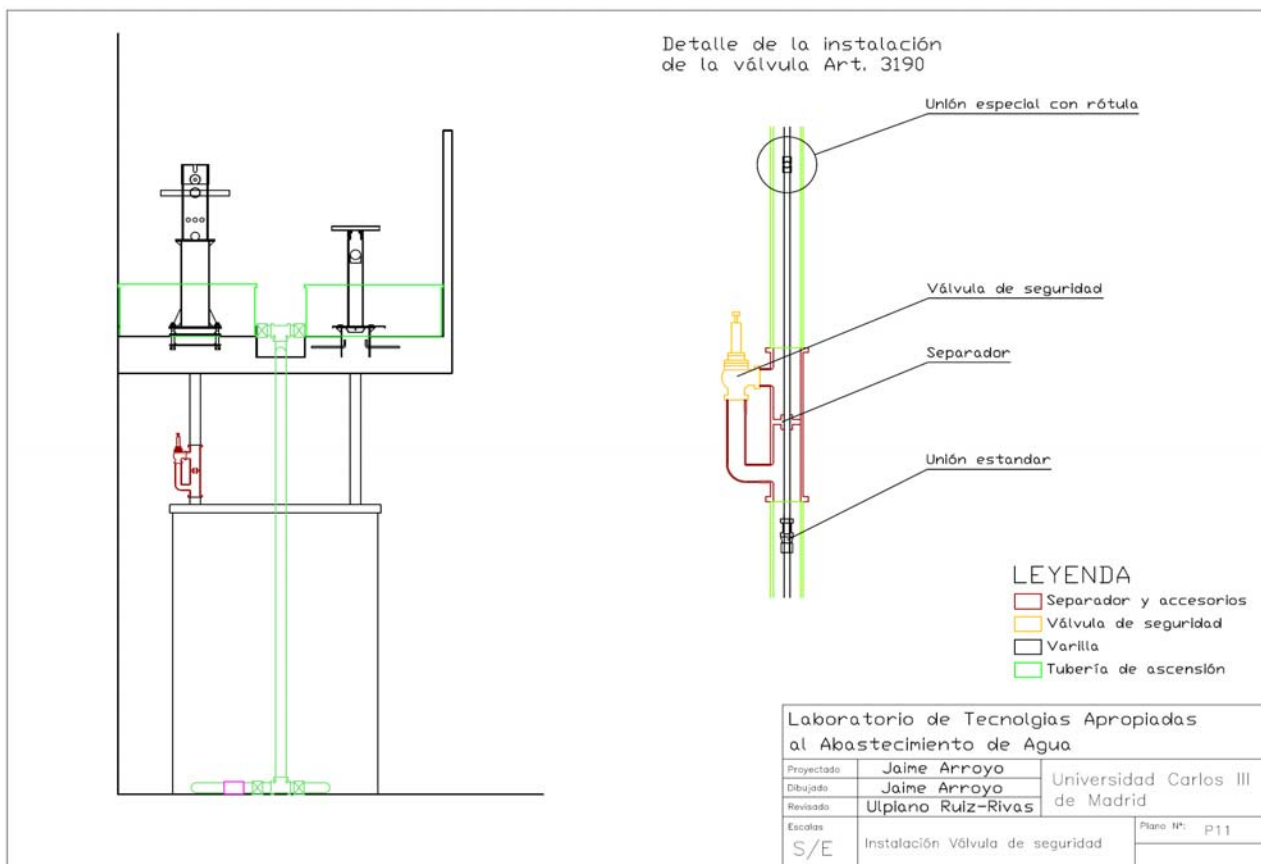
	Pendiente (deg°)	Presión apertura <10 l/min (bar)	Presión 20 l/min (bar)	Error
Pos 1	89,7	1,48	1,56	5,52%
Pos 2	89,6	1,90	2,08	8,53%
Pos 3	89,7	2,33	2,46	5,51%
Pos 4	89,5	2,60	2,85	8,91%
Pos 5	89,7	3,40	3,54	3,97%
Pos 6	89,6	3,80	3,95	3,72%
Error máximo medio (%) =				6,03%

Como se ve la estimación del error en un valor medio para un caudal de 20 l/min y no será exacto si se bombea a otros valores, aún así si proporciona un orden de magnitud suficiente para, a priori, pensar que la válvula de seguridad Art. 3190 es apta para su empleo en el banco de ensayos. El error esperable en cuanto a la profundidad de simulación es del 6,03%; lo cual se traduce, a efectos prácticos, en una oscilación  $\pm 0,5$  metros de columna de agua sobre el pistón respecto a la profundidad de simulación, un valor perfectamente admisible.

### 3.3.4.1.2 Accesorios

Para instalar correctamente la válvula es preciso desviar el flujo de agua a una tubería donde, sin la presencia de la varilla, situar la varilla. Se necesitarán los siguientes equipos:

- Unión de varillas con rótula. Esta pieza se colocará por encima de la altura de la válvula de seguridad. Su misión es absorber los desplazamientos horizontales que el mecanismo de la palanca transmite a la varilla para poder situar el separador entre la zona presurizada y la zona sin presurizar.
- Separador: Esta pieza se sitúa a la misma altura de la válvula de seguridad, actúa como separador entre la zona presurizada y la zona no presurizada. Su diseño será lo más estanco posible.
- Desviación auxiliar: Para desviar el flujo harán falta dos te a 90° reducidas al diámetro de la válvula de seguridad, dos codos del mismo diámetro y tubería para ensamblar todo el sistema.



**Fig56. Instalación de la válvula de seguridad**

### 3.3.4.2 Sistema de pesas

En los cálculos previos se ha constatado el error considerable que se cometería sino prevé un mecanismo para simular la variación del peso de la varilla según su longitud (profundidad de operación).

La principal dificultad que presenta el sistema de pesas es su localización. A priori hay dos puntos en donde pudiera colocarse el conjunto.

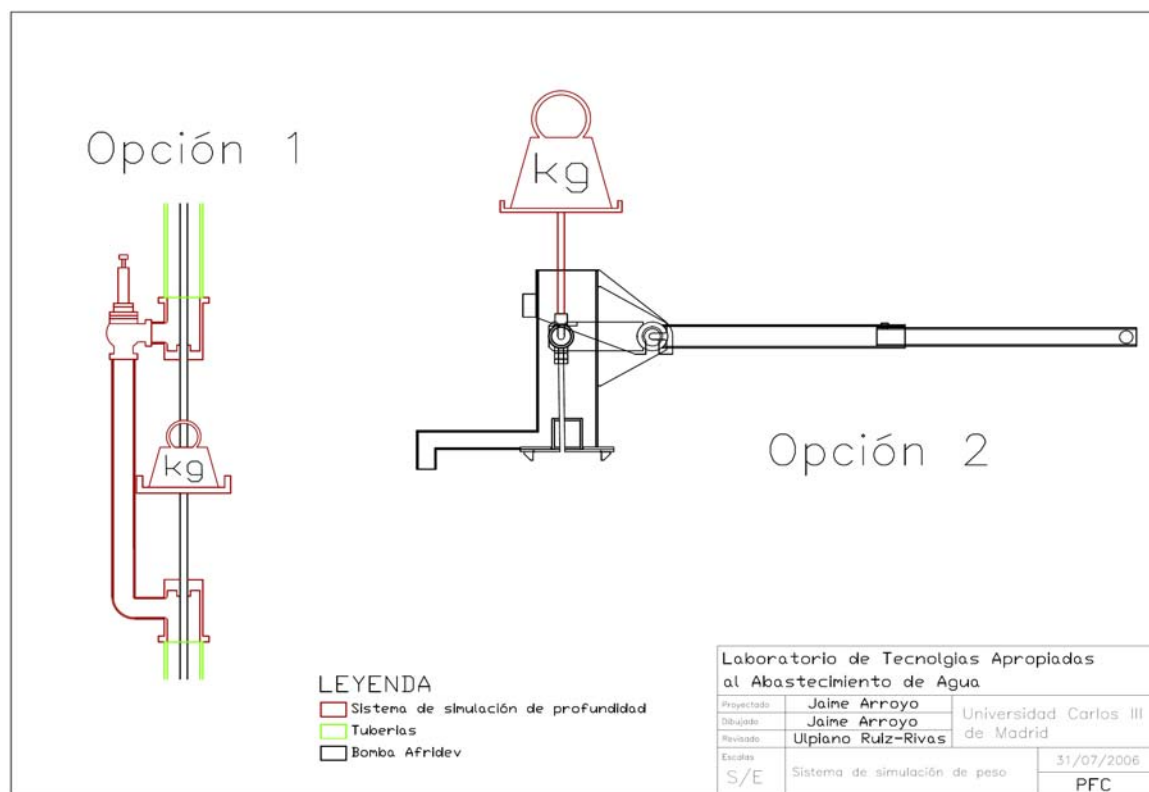


- Habilitando un espacio intermedio coincidiendo con la desviación de caudal a la válvula de seguridad
- Habilitando un espacio sobre la bomba de tal forma que los pesos actúen directamente sobre la varilla

El principal inconveniente de la primera opción es que el sistema quedaría en un punto de difícil acceso (mediante una escalera) lo que dificultaría la regulación del mismo en función de la profundidad. De igual modo se complica el diseño del separador necesario porque al existir un tramo de la varilla al aire resultara más difícil conseguir un sistema estanco.

La segunda opción parece más sencilla a priori. Habría que modificar la configuración superior de la bomba abriendo un espacio para unir solidariamente el sistema de pesas y la varilla. El principal inconveniente de esta opción es lo aparatoso que puede resultar el conjunto. Es difícil aproximar cual es el diseño idóneo pues al estar sobre la plataforma las limitaciones de espacio son evidentes.

A continuación en la figura 57 se muestran las dos opciones viables:



**Fig57. Sistema de simulación de peso**

La decisión final sobre la instalación de un sistema u otro se retrasa hasta conocer las dimensiones exactas de la plataforma, resultando más atractiva la opción 1.

Con los valores obtenidos anteriormente de la Afridev se halla de manera sencilla el valor del peso a añadir en función de la profundidad (tabla 3.14):

**Tabla 3.14.** Peso necesario para compensar la profundidad

Profundidad	Fuerza sin variación peso varilla (kN)	Fuerza con variación peso varilla (kN)	Diferencia de peso (kN)	Peso a añadir (kg)	Peso simulación (kg)
5	158,25	180,30	22,06	2,25	5,00
6	182,30	215,39	33,08	3,37	
7	206,35	250,47	44,11	4,50	
8	230,41	285,55	55,14	5,62	
9	254,46	320,63	66,17	6,75	
10	278,51	355,71	77,20	7,87	10,00
11	302,57	390,79	88,22	8,99	
12	326,62	425,87	99,25	10,12	
13	350,67	460,95	110,28	11,24	
14	374,72	496,03	121,31	12,37	
15	398,78	531,11	132,34	13,49	15,00
16	422,83	566,20	143,37	14,61	
17	446,88	601,28	154,39	15,74	
18	470,94	636,36	165,42	16,86	
19	494,99	671,44	176,45	17,99	
20	519,04	706,52	187,48	19,11	20,00
21	543,09	741,60	198,51	20,24	
22	567,15	776,68	209,53	21,36	
23	591,20	811,76	220,56	22,48	
24	615,25	846,84	231,59	23,61	
25	639,30	881,92	242,62	24,73	25,00
26	663,36	917,00	253,65	25,86	
27	687,41	952,09	264,67	26,98	
28	711,46	987,17	275,70	28,10	
29	735,52	1022,25	286,73	29,23	
30	759,57	1057,33	297,76	30,35	30,00
31	783,62	1092,41	308,79	31,48	
32	807,67	1127,49	319,82	32,60	
33	831,73	1162,57	330,84	33,73	
34	855,78	1197,65	341,87	34,85	
35	879,83	1232,73	352,90	35,97	35,00
36	903,89	1267,81	363,93	37,10	
37	927,94	1302,89	374,96	38,22	
38	951,99	1337,98	385,98	39,35	
39	976,04	1373,06	397,01	40,47	
40	1000,10	1408,14	408,04	41,59	40,00
41	1024,15	1443,22	419,07	42,72	
42	1048,20	1478,30	430,10	43,84	
43	1072,26	1513,38	441,12	44,97	
44	1096,31	1548,46	452,15	46,09	
45	1120,36	1583,54	463,18	47,22	45,00
46	1144,41	1618,62	474,21	48,34	
47	1168,47	1653,70	485,24	49,46	
48	1192,52	1688,79	496,27	50,59	
49	1216,57	1723,87	507,29	51,71	
50	1240,63	1758,95	518,32	52,84	50,00
51	1264,68	1794,03	529,35	53,96	
52	1288,73	1829,11	540,38	55,08	

53	1312,78	1864,19	551,41	56,21	60,00
54	1336,84	1899,27	562,43	57,33	
55	1360,89	1934,35	573,46	58,46	
56	1384,94	1969,43	584,49	59,58	
57	1409,00	2004,51	595,52	60,71	65,00
58	1433,05	2039,59	606,55	61,83	
59	1457,10	2074,68	617,57	62,95	
60	1481,15	2109,76	628,60	64,08	
61	1505,21	2144,84	639,63	65,20	70,00
62	1529,26	2179,92	650,66	66,33	
63	1553,31	2215,00	661,69	67,45	
64	1577,36	2250,08	672,72	68,57	
65	1601,42	2285,16	683,74	69,70	

Para el sistema de pesas, a la vista de estos resultados obtenidos es suficiente con pesas cada 5 kg, con lo que se reduce el número de elementos del sistema hasta un máximo de 70 kg. El error cometido con este método en el conjunto de esfuerzos presentes en el sistema no será apreciable a la hora de simular unas condiciones de operación reales para la bomba.

#### **3.3.4.2.1 Selección de equipos**

La principal diferencia entre los sistema de pesas es el material del que están compuestas, el material más denso disponible es el plomo, pero su toxicidad obliga a ciertas precauciones para su manipulación. El material más comúnmente empleado es el hierro fundido, que no presenta ninguna toxicidad aunque es menos denso que el plomo.

A modo orientativo se han consultado diversos proveedores encontrándose sistemas de pesas perfectamente calibrados para los requerimientos del sistema. Por ejemplo, Proman Instrumentación oferta pesas de hierro fundido lacado de 5kg, 10kg, 20kg y 50kg, suficientes para satisfacer los requisitos del sistema.

### **3.3.5 Instalación demostrativa**

Para facilitar la observación se considera la instalación de tuberías de ascensión transparentes. Estas serán adquiridas en España y no afectan al funcionamiento global de las bombas. En un principio se ha pensado dotar únicamente al puesto 1 (bomba Malda), de uso demostrativo de este tipo de tubería. El material considerado para realizar las tuberías es metacrilato, apto para trabajar bajo presión y totalmente transparente.

#### **3.3.5.1 Selección de equipos**

Se ha encontrado una empresa distribuidora de tuberías de metacrilato, KETERSA. Desafortunadamente no existe tubería con el diámetro interno idéntico al de la tubería de ascensión de la Malda por lo que se selecciona una con un diámetro algo superior. Esto supondrá el empleo de unas juntas especiales para acoplar la parte del pistón con las tuberías añadidas.

### **Tubería de metacrilato:**

Diámetro ext:	60 mm
Diámetro int:	52 mm

La diferencia en diámetro de la tubería de HDPE de la Malda y la de metacrilato es de 2mm

### **3.4 Instrumentación del Banco de Ensayos**

Una vez configurado el banco de ensayos hay que considerar la instrumentación del mismo de manera que se puedan registrar y controlar los parámetros básicos de funcionamiento de las bombas, especialmente de aquella a la que además se le ha incluido un sistema de simulación de la profundidad.

Para ello se definen una serie de parámetros a monitorizar y el punto en el que se realizará el mismo. Éstos son:

- *Caudal de bombeo:* Se registrará este valor para cualquiera de las dos bombas mediante un caudalímetro. El punto idóneo para medir este valor es en el sistema de retorno de agua.
- *Presión en el pistón:* Este valor se monitorizará tan sólo en la bomba Afridev. Servirá para certificar el buen funcionamiento del sistema de simulación y para saber a que profundidad estoy simulando exactamente. Para tomar la medida se necesitará un manómetro y un punto de medida que estará situado aguas arriba del pistón, próxima al éste.
- *Esfuerzo aplicado:* Este valor se monitorizará tan solo en la bomba Afridev.

Además de los aparatos de medida para los datos mencionados se añadirá un motor a la bomba Afridev para poder funcionar la misma de manera automática y controlada; y también se incluirá una tarjeta de adquisición de datos para canalizar los flujos de información existentes.

#### **3.4.1 Caudalímetro**

En la medición del caudal la precisión o la resolución temporal no son variables críticas. Siguiendo las premisas de sencillez del diseño se opta por instalar un contador de agua con generador de impulsos. La precisión de este tipo de aparatos suele ser de 0,1 l. Son analógicos. De acuerdo con el diseño del sistema de retorno (Fig52) un único aparato servirá para medir el caudal de las dos bombas, Malda y Afridev.

##### **3.4.1.1 Selección de equipos**

De los productos encontrados se ha seleccionado el fabricado por CONTHIDRA S.L. con las siguientes características:

<b>Modelo:</b>	Combi CU 20. Ref: CO2520T115
Diámetro nominal:	20 mm
Caudal nominal:	2,5 m <sup>3</sup> /h
Caudal máximo:	5 m <sup>3</sup> /h
Longitud:	115 mm
Altura:	99,5 mm
Anchura:	72,5 mm
Peso:	0,5 kg

Este modelo lleva acoplado un generador de impulsos de marea que genera un impulso por litro de agua registrado. Se considera que es suficiente precisión.

### 3.4.2 Medición del esfuerzo

La medición de esfuerzo aplicado se realizará mediante galgas extensiométricos debidamente calibradas. Para la calibración de las mismas es preciso montar el sistema de aplicación de fuerza completo o lo que es lo mismo contar con la bomba Afridev.

Las galgas se emplean para medir deformaciones, que son proporcionales a la fuerza aplicada. Las galgas se localizarán en la base de la palanca que es el punto con mayores deformaciones (Fig58).

Por otra parte, si con el sistema de pesas se escoge la opción 1, se contará con un tramo de varilla de fácil acceso por lo que también puede resultar interesante colocar en ese punto unas galgas extensiométricos para medir el esfuerzo.

La realización de la instrumentación para la medida del esfuerzo será una de las tareas pendientes del proyecto, pero resulta imposible acometer este trabajo sin contar la bomba Afridev en la Universidad, que por otra parte se espera recibir dentro de poco.

### 3.4.3 Manómetro

Será necesaria la instalación de un manómetro para monitorizar la presión en el pistón. Este estará situado entre el cilindro y la válvula de seguridad y medirá la presión existente (Fig58). Para poder controlar el funcionamiento de la bomba de manera efectiva el manómetro será de tipo digital, con emisor de señal que será registrada por la tarjeta de adquisición de datos. En la medida de lo posible será apto para trabajar con aguas de distintas calidades para facilitar la experimentación con la bomba.

El rango de presiones que debe recoger el manómetro es de 1.9 a 8 bares.

#### 3.4.3.1 Selección de equipos

De los manómetros ofertados se ha seleccionado modelo S10, versión estándar, fabricado por WIKA con las siguientes características:

<b>Modelo:</b>	S-10
Rango de medición:	10bar
Límite de sobre carga:	35bar
Presión de rotura:	42bar
Material:	Acero inoxidable
Señal de salida:	4...20mA, 2-hilos
Precisión:	<0.5 %del span (ajuste del punto límite)
Peso:	0,2 kg

### 3.4.4 Motor eléctrico

Para facilitar la experimentación en el puesto de trabajo de la Afridev, que es el único que incluye sistema de simulación de la profundidad, se instalará un sistema de aplicación de esfuerzo automático y regulable.

Después de consultar distintas fuentes la solución más adecuada parece la instalación de un motor hidráulico consistente en un pistón hidráulico junto una bomba hidroeléctrica. Los parámetros de diseño para el banco de ensayos están expresados en la tabla 3.15:

**Tabla 3.15.** Parámetros de funcionamiento del motor hidráulico

Carrera (mm)	Fuerza mínima (kN)	Fuerza máxima (kN)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
100	1.195	5.150	0,025	0,125
300	390	1.750	0,075	0,35
600	190	900	0,15	0,7
900	125	575	0,225	1,15
1150	100	450	0,287	1,3

En la tabla se ofrecen diversas opciones en función de la localización del cilindro hidráulico (Fig58). La potencia efectiva del sistema debe ser superior a 500W para permitir la experimentación en todo el rango de profundidades consideradas. De los productos ofertados se escogerá aquella que ofrezca mejores propiedades.

La realización e instalación del motor se llevará a cabo una vez esté terminada la construcción del banco de ensayos y queda fuera de los límites de este proyecto.

### 3.4.5 Tarjeta de adquisición de datos

Para canalizar toda la información del banco de ensayos es necesaria una tarjeta de adquisición de datos. Esta tendrá la misión de comunicar cada uno de los instrumentos de medida con un PC para permitir trabajar con los datos recabados.

Los flujos de información en el laboratorio están establecidos en la tabla 3.16:

**Tabla 3.16.** Señales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos

Entrada de datos	Aparato	Características	Unidades	Tipo de señal	Equipo
1	Manómetro	Medida de presión	bares	Eléctrica	Afridev
2	Galgas extensiométricas	Medida de esfuerzo. Señal de tipo variable que oscila según el movimiento de la palanca, este hecho servirá para contar el número de ciclos realizados en cada experimento	mm	Eléctrica	Afridev
3 y 3bis	Contador	Caudal total de agua. Se emplea un contador analógico que emite un impulso eléctrico por litro registrado	Litros	Impulso eléctrico	Afridev, Malda
5	Sensor nivel de agua en el depósito	Las medidas y el funcionamiento de las bombas manuales están condicionadas por el nivel de agua existente en el pozo, por ello se considera una posible monitorización de este valor	cm	Analógica	Afridev, Malda

### 3.4.5.1 Selección de equipos

La tarjeta de adquisición de datos seleccionada para el proyecto es:

**Modelo:** NI USB-6008 12-bit, 10kS/s Multifunction I/O and NIDAQmxSoftware

**Fabricante:** National Instruments

La tarjeta seleccionada dispone de 7 entradas de datos y una salida. Esto permitirá regular el funcionamiento del motor eléctrico desde el PC.

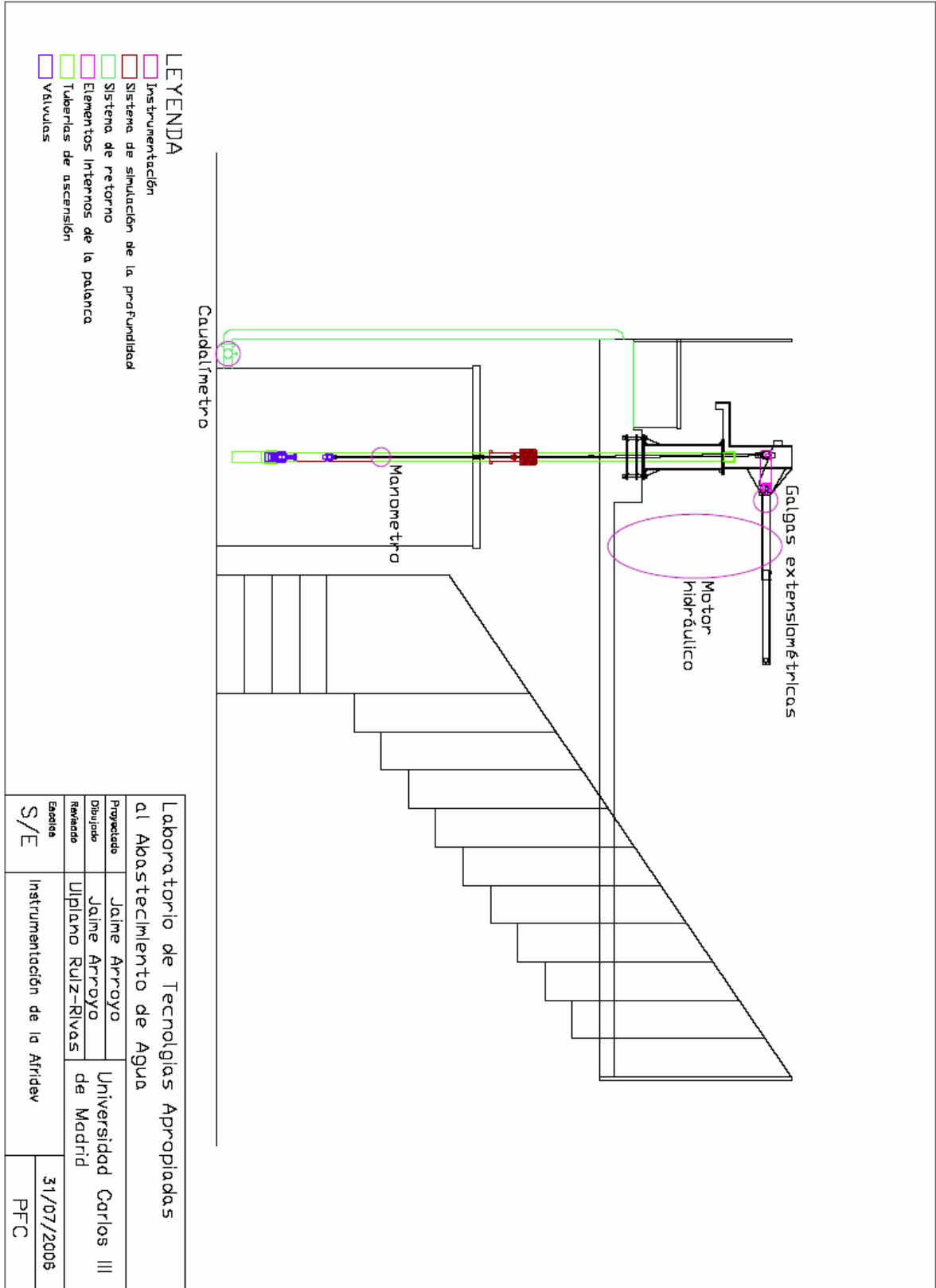


Fig58. Instrumentación del banco de ensayos



### 3.5 Presupuesto

El presupuesto aproximado del banco de ensayos es:

Concepto	Artículo	Uds.	Descripción	Precio unidad	Precio total	Distribuidor
Bombas Manuales						
	Afridev Handpump	1	Bomba manual de pozo profundo con todos los accesorios, tecnología de domino público. Rango de profundidades de 10 a 45 metros	177 €	177 €	Meera & Ceiko
	Malda Handpump	1	Bomba manual de acción directa con todos los accesorios, tecnología de dominio público. Rango de profundidades de 0 a 15 metros	186 €	186 €	Meera & Ceiko
	Transporte		Costes de transporte entre el fabricante (India) y la Universidad Carlos III de Madrid		822 €	Meera & Ceiko
TOTAL					1.185 €	
Válvulas						
	Válvula de simulación	1	Valvula de seguridad convencional adaptada a los requerimientos de la instalación	31,41 €	31,41 €	Vaindusa
	Válvulas del sistema de retorno	4	Valvúlas de bola para regular el retorno. Diametro 63mm	22,75 €	91,00 €	Vaindusa o Aiqsa
TOTAL					122,41 €	
Pesos						
	Peso de 5 kg	1	Peso de hierro fundido lacado para el sistema de pesas	60,00 €	60,00 €	Proman
	Peso de 10 kg	1	Peso de hierro fundido lacado para el sistema de pesas	80,00 €	80,00 €	Proman
	Peso de 20 kg	2	Peso de hierro fundido lacado para el sistema de pesas	115,00 €	230,00 €	Proman
	Peso de 50 kg	1	Peso de hierro fundido lacado para el sistema de pesas	300,00 €	300,00 €	Proman
TOTAL					670,00 €	
Tuberías						
	Metacrilato	5m	Tuberías de metacrilato con diámetro int. de 52mm y ext. de 60mm para instalación demostrativa de la Malda. Unidad mínima 5 metros	24,65€/m	123,25 €	Ketersa
	PVC	5m	Tubería de PVC PN16 de diametro ext 1" para situar la válvula de seguridad. Unidad mínima 5 metros	1,33€/m	6,65 €	Aiqsa
	PVC	5m	Tubería de PVC PN16 de diámetro ext. 32mm para circuito de retorno del agua. Unidad mínima 5 metros	1,33€/m	6,65 €	Aiqsa
	PVC	5m	Tubería de PVC PN16 de diámetro ext. 63mm para circuito de retorno del agua. Unidad mínima 5 metros	5,57€/m	27,85 €	Aiqsa
	Accesorios PVC	10	Codo a 90º mixto de PVC PN16 diametro 32mm a 1". Se vende en pack de 10 unidades	1,11 €	11,10 €	Aiqsa
		5	Te a 90º reducida 63x32x63mm de PVC PN16 para desviar el flujo del sistema de simulación. Se venden en pack de 5 unidades	3,10 €	15,50 €	Aiqsa
		5	Codo a 90º de PVC PN16 diametro 63mm. Se vende en pack de 5 unidades	2,22 €	11,10 €	Aiqsa
			Uniones a depositos y accesorios varios en PVC	50,00 €	50,00 €	Ketersa o Aiqsa
TOTAL					252,10 €	
Plataforma						
	Estructura		Plataforma elevada para situar los puestos de trabajo	Sin definir		UC3M
	Sujecciones y cimentación		Sistema de sujección al suelo para las bombas manuales	Sin definir		UC3M
TOTAL					0.00 €	

\*Estimado

## Diseño de un banco de ensayos de bombas manuales

Instrumentación							
	Manómetro	1	Manómetro y accesorios para instalación del mismo	200,00 €	200,00 €	WIKA	
	Galgas extensiométricas	1	Para medir el esfuerzo realizado	Pendiente			
	Motor eléctrico	1	Para experimentación	Pendiente			
	Contador	1	Contador para agua fría de Cohisa modelo Combi CO2520T115 pre-equipado para emisor, con emisor incluido	57,16€+ 35,56€	92,72 €	Conthidra S.L.	
	PC	1	Para monitorizar la instalación	Se reciclará un equipo de la UC3M			
	Tarjeta de adquisición de datos	1	Tarjeta de adquisición de datos de NI 779051-51	170,99 €	170,99 €	National Instruments	
TOTAL				463,71 €			
Otros							
	Depositos grandes	1	Para situar el pistón de la Afridev y la Malda	200,00 €	200,00 €	Aiqsa	*Estimado
	Depositos pequeños	2	Para el sistema de retorno de agua	100,00 €	100,00 €	Resopal	*Estimado
	Otros gastos		Imprevistos	100,00 €	100,00 €	Varios	*Estimado
	Sujecciones para tuberías	4	Sistema de sujección para la tuberías de bombeo, se situarán dos por cada bomba, en la parte inferior y superior	50,00 €	50,00 €	Aiqsa o Ketersa	*Estimado
	TOTAL				450,00 €		
TOTAL:				3.143,22 €			

## **4 Procedimientos de Evaluación de Bombas Manuales**

Una vez diseñada la instalación hay que determinar el modo en el cual se va a caracterizar y evaluar el funcionamiento de las bombas instaladas. El único precedente existente está en el proyecto “Rural Water Supply Handpumps Project” liderado por el Banco Mundial, realizado a comienzos de la década de los 80. En el mismo se llevó a cabo la evaluación de más de 70 modelos distintos de la época. Los ensayos realizados en este proyecto ayudaron al desarrollo del concepto VLOM.

Tomando todo ese trabajo como guía se elabora en este capítulo un procedimiento estándar para la evaluación de bombas manuales. Luego se completará este trabajo con el desarrollo de unos procedimientos complementarios propios, adaptados a las características y fines del laboratorio. El procedimiento estándar prestará especial énfasis en detectar aquellos aspectos de la bomba que entren en conflicto con el concepto VLOM, mientras que el segundo enfoque prestará mayor atención a los aspectos docentes, y a las capacidades de I+D del banco de ensayos.

No se pretende elaborar un modelo rígido de evaluación, simplemente se pretende aportar unas directrices básicas que deben guiar el procedimiento de evaluación y ensayo de bombas manuales.

### **4.1 *Procedimiento Estándar***

Este procedimiento está basado en el trabajo publicado en los libros “Laboratory Testing Handpumps for Developing Countries: Final Technical Report” y “Handpumps: Toward a Sustainable Technology”.

#### **4.1.1 Obtención de los equipos**

El primer paso es la obtención de los equipos seleccionados. En la medida de lo posible se buscará un proveedor independiente y representativo de lo existente en el mercado, prestando especial interés a los siguientes aspectos:

- Datos del fabricante y/o agencia suministradora.

- Modelo y configuración de componentes así como los valores de referencia proporcionados por el fabricante
- Coste

El Banco Mundial aconseja la adquisición de dos unidades de cada bomba. Para el laboratorio se ha preferido adquirir sólo una unidad de cada modelo.

### 4.1.2 Inspección previa

A la recepción de los equipos se realizará una evaluación del empaquetamiento y documentación adjunta dejando constancia de:

- Empaquetamiento: Se evaluará el tipo de envoltorio, seguridad del mismo, comodidad, facilidad para el transporte en países en desarrollo.
- Estado de las bombas: Se constatará el grado de montaje de las mismas, defectos visibles a la entrega, ausencia de piezas...
- Literatura entregada. Manuales, especificaciones técnicas, idiomas disponibles...

### 4.1.3 Medidas y consideraciones previas

Antes de realizar el montaje de la bomba se realizarán las siguientes medidas:

- Peso de los principales componentes incluyendo la palanca, el cuerpo de la bomba, varilla, tuberías y sub-ensamblajes
- Estudio dimensional de la bomba, detallando las dimensiones de los componentes del cilindro de bombeo incluyendo la medida de la longitud de carrera, diámetro nominal y volumen nominal...
- Se medirá y evaluará de manera precisa la pieza destinada a forro de fricción
- Se realizará un análisis ergonómico de los componentes de la bomba, tanto por separado como en su conjunto. Se tomarán las siguientes medidas:
  - Altura máxima y mínima de la palanca
  - Altura de la plataforma (cuando sea aplicable)
  - Desplazamiento angular
  - Longitud de la palanca
  - Frecuencia de operación. Se estimara una velocidad media de movimiento de la palanca, así como de desplazamiento del pistón

En caso de omitirse la información sobre la altura óptima de la palanca se tomarán los siguientes valores: El punto medio del recorrido de la palanca estará a ~0,9m respecto del suelo; el caño de la bomba tendrá una altura máxima al suelo de ~0,6m

### 4.1.4 Caracterización del funcionamiento

Se registrarán los siguientes valores:

- Caudal, el esfuerzo aplicado y rendimiento: Estos valores están estrechamente relacionados y se pueden determinar en un solo experimento. Para las bombas de succión y acción directa la profundidad de experimentación será de 7m, para bombas de pozo profundo se experimentará para 7m, 25m y 45m (Fig59). Sólo si se estima necesario se realizarán test a otras profundidades.

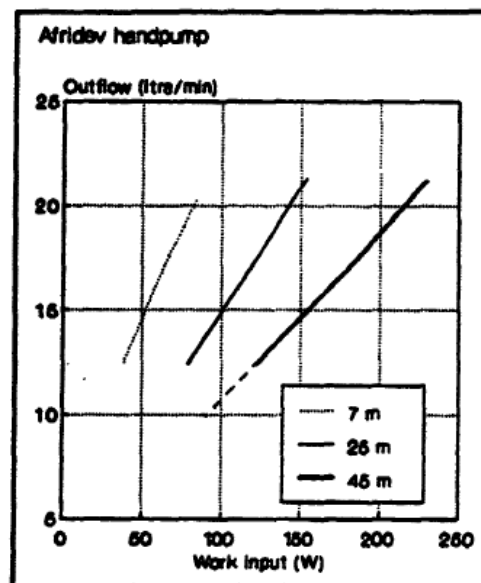


Fig59. Caudal vs Esfuerzo. (Reynolds 1992)

- Cada bomba será evaluada para tres frecuencias de operación distintas, típicamente 30, 40 y 50 paladas o revoluciones por minuto. Este valor será alterado si el fabricante o la experiencia previa así lo indican.
- Evaluación de pérdidas en el pistón. Se tomarán valores en las mismas condiciones que el experimento anterior.

Con los datos recabados se elaborarán gráficas representativas del funcionamiento de la bomba (Fig60)

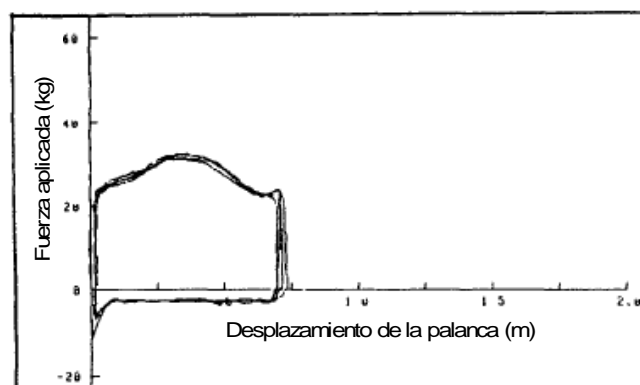


Fig60. Grafica de funcionamiento obtenida en el laboratorio del Banco Mundial

### 4.1.5 Experimentación del usuario

Se reunirá un pequeño grupo de voluntarios, entre estos habrá mujeres y niños de distintas edades y pesos. A todos los miembros del grupo se les dará oportunidad de familiarizarse con el equipo y se les permitirá acomodarse de la manera que ellos consideren más confortable para la operación de la bomba. Después cada uno de ellos deberá rellenar un recipiente de 10 litros sin límite de tiempo. Se anotará el número de paladas realizadas.

El Banco Mundial configuro grupos de 60 personas para este test compuestos por:

- 6 hombres con estatura inferior a 1,68m
- 6 hombres con estatura comprendida entre 1,68 y 1,79m
- 6 hombres con altura superior a 1,79m
- 6 mujeres con estatura inferior a 1,63m
- 6 mujeres con estatura comprendida entre 1,63 y 1,69m
- 6 mujeres con estatura superior a 1,69m
- 6 niñas con estatura comprendida entre 1,35 y 1,49m
- 6 niñas con estatura comprendida entre 1,50 y 1,65m
- 6 niños con estatura comprendida entre 1,35 y 1,49m
- 6 niños con estatura comprendida entre 1,50 y 1,65m

Las profundidades de bombeo fueron 7m para bombas de poca profundidad y 10 para bombas de pozo profundo.

### 4.1.6 Test de resistencia

Test de resistencia: Consistente en dos periodos de 2.000 horas con comprobación del caudal de bombeo después de cada serie.

Para la realización de este experimento se contará con la ayuda de un motor eléctrico que aplique una frecuencia de aplicación constante, de 40 paladas minuto. La profundidad simulada será de 45m para bombas de pozo profundo, y de 12m para bombas intermedias

El primer test se realizará con agua limpia dura, con un pH aproximado de 7,2. Después del mismo se anotará el caudal de bombeo.

El segundo test se realizará con agua dura a la que se le añadirá: Un gramo por litro de kieselgurh (sílice amorfa) con un diámetro máximo de partícula de 7,5 $\mu$ m y un gramo por litro de arena de cuarzo con un diámetro comprendido entre 75 $\mu$ m y 500 $\mu$ m.

Después de concluido el experimento se repetirán la experimentación descrita en el punto anterior.

En caso de rotura se detendrá el experimento y se llevará a cabo un análisis completo del fallo determinando las causas y las posibles soluciones.

A parte de los procedimientos aconsejados las posibilidades de experimentación con aguas pretratadas son múltiples y ofrecen un campo de investigación muy interesante en cuanto a la posibilidad de evaluar el comportamiento de una bomba ante un tipo de agua concreto.

### 4.1.7 Test de abuso

La finalidad de estos test es simular el abuso tanto accidental (animales domésticos...) como intencionado que pueda darse de manera más o menos habitual en los equipos de bombeo

- Test de uso de la palanca: Impactos controlados son aplicados simulando el contacto entre la bomba y la palanca existente durante el movimiento. El nivel de impacto de obtendrá a través de un operario. Para cualquier tipo de bomba la profundidad simulada del pistón durante el experimento será de 7m. Para bombas de pozo profundo se aplicarán 96.000 ciclos o hasta rotura, para el resto de bombas el número de ciclos es 72.000 o hasta rotura.
- Test de impacto en el cuerpo de la bomba: Mediante el uso de un péndulo se realizarán series de impacto con fuerzas entre 100 y 500 julios en el centro de la pieza.
- Test de impacto en la palanca: Mediante el empleo de un péndulo se realizarán series de impacto con fuerzas entre 50 y 200 julios en el centro de la pieza.

### 4.1.8 Ingeniería

Las bombas serán completamente desmanteladas tanto a su recepción, tantas veces se estime oportuno durante su operación y al final del proceso de evaluación.

En el primer análisis se estudiarán los materiales y las características constructivas de cada pieza. Todo este estudio se realizará con el enfoque tecnología apropiada al desarrollo y deberá dejar registro de:

- Materiales y técnicas de fabricación
- Capacidad de transferencia a países en desarrollo
- Facilidad de montaje, mantenimiento y reparación
- Resistencia a la contaminación y el abuso. Tanto fortuita como intencionada
- Riesgos potenciales derivados del manejo
- Al final del análisis se propondrán diseños alternativos para subsanar las carencias encontradas

En caso de aplicarse alguna mejora esta será monitorizada para comprobar el funcionamiento de la misma.

### 4.1.9 Evaluación de la bomba

Se revisará toda la información recogida y se analizará en pos de determinar de manera sencilla:

- Principales características operativas de la bomba
- Virtudes y defectos
- Potencial VLOM

### 4.1.10 Publicación de resultados

La elaboración de la documentación se escalonará en tres pasos:

- Informe interno: Incluirá todos los aspectos relevantes de la evaluación. Será remitido a las partes interesadas (fabricantes, organizaciones reguladoras...)
- Estudio de los resultados de campo obtenidos por la bomba
- Informe final: Incluirá toda la información recabada que se considere de interés

## 4.2 *Procedimientos de Evaluación Propios*

Dadas las obvias diferencias entre las capacidades y fines del laboratorio habilitado por el Banco Mundial y el laboratorio que se va a desarrollar en la Universidad Carlos III de Madrid se ha creído necesario completar los procedimientos de evaluación de bombas manuales con una serie de aportaciones.

### 4.2.1 Experimentos previos

Se considera interesante profundizar el estudio de las piezas y ensamblajes básicos para el funcionamiento de la bomba manual. Así mediante experimentos sencillos se pueden determinar parámetros básicos de funcionamiento de los elementos clave de la bomba:

- Caracterización de la válvula de pie, registrando: Presión de apertura, Tiempo de apertura, Tiempo de cierre, Pérdida de carga, Pérdidas de agua,...
- Caracterización de la válvula del pistón registrando: Presión de apertura, Tiempo de apertura, Tiempo de cierre, Pérdida de carga, Pérdidas de agua,...
- Test de pérdidas: Se experimentará para contabilizar las pérdidas en el pistón durante el bombeo.



### 4.2.2 Caracterización del funcionamiento

Los experimentos realizados por el Banco Mundial arrojan muy poca información acerca del comportamiento de la bomba lejos de los puntos que ellos han considerado normales de funcionamiento. Por ello se considera interesante completar la caracterización del funcionamiento.

Se completarán los experimentos estándar con:

- Determinación del caudal de bombeo en función de la profundidad a esfuerzo constante. Los valores de esfuerzo serán: 50W, 75W y 100W para una profundidad de 15m, 25m, 35m y 45m en bombas de pozo profundo y de 5m, 7m, 12m y 15m para bombas de profundidad media. A partir de la información recabada determinar el rendimiento de la bomba para las distintas profundidades y la frecuencia de aplicación óptima.
- Determinación del caudal de bombeo en función de la profundidad a frecuencia de aplicación constante. La frecuencia de aplicación será: 30, 40, 50 y 60 paladas por minuto, para una profundidad de 15m, 25m, 35m, y 45m en bombas de pozo profundo y de 5m, 7m, 12m y 15m para bombas de profundidad media. A partir de la información recabada determinar el rendimiento de la bomba para las distintas profundidades y la frecuencia de aplicación.
- Análisis de funcionamiento en los límites recomendados. Existe cierto desconocimiento acerca de los límites reales de operación y porqué surgen.

Para bombas de poca profundidad se estiman dos zonas que requieren un análisis detallado. La primera en para profundidades inferiores a 7m donde hay conflicto entre las bombas de acción directa y las de succión. La segunda para profundidades entre 10 – 15 m en donde entran en conflicto con las bombas de pozo profundo.

Para bombas de pozo profundo se estiman dos zonas que requieren un estudio más detallado. La primera para profundidades entre 10 – 15m al igual que en el caso anterior y para profundidades superiores a 45m donde no se ha estimado con precisión los límites reales de bombeo.

### 4.2.3 Experimentación por el usuario

Dada la finalidad docente del laboratorio se aprovechará el mismo para la realización de prácticas con los alumnos, y cursos en general con la comunidad universitaria y personas interesadas.

Al voluntario se le concederá un tiempo de familiarización con la bomba después del cual se le requerirá que bombee, en series de 20 litros, un total de 100 litros. Este valor es el necesario para proveer a una familia (5 miembros) de agua según el nivel de servicio imprescindible (20lpd) de abastecimiento de agua. Se cronometrará el tiempo empleado y el número de paladas. Después rellenará un formulario contando sus impresiones. Si el voluntario accede se someterá a una segunda serie de bombeo, esta vez en tandas de 25 - 40 litros (a su elección) se le pedirá que bombee un total de 300 litros (60 por persona/familia). Al finalizar el proceso se le pedirá que rellene una hoja con sus impresiones.

Se procurara que no solo personas jóvenes (alumnos) tengan acceso a la bomba, sino que se fomentará que niños y niñas operen las bombas tratando de imitar la situación existente en los países en desarrollo.

### 4.2.4 Test de resistencia y abuso

Ambos test, propuestos por el Banco Mundial, son de gran interés pero dado que los recursos del laboratorio están relativamente limitados su aplicación estará condicionada ya que aceleran el desgaste de una bomba que, por otra parte se espera, este a disposición de la comunidad universitaria durante muchos años lo que equivale a un test de abuso y resistencia igual de efectivo.

Por otro lado, uno uso intensivo de las mismas por parte de alumnos, investigadores y personas interesadas compensará en cierta medida la omisión de estas pruebas en cuanto a desgaste y uso abusivo de la bomba. De la misma forma se recomienda observar y anotar los malos usos que se realicen con la bomba para poder hacerse una idea del posible maltrato que en una comunidad rural puede recibir una bomba ante el posible rechazo por parte de algunos miembros de la misma.

### 4.2.5 Ensayos propuestos

Aparte del procedimiento definido se quiere proponer una serie de ensayos que se consideran interesantes y pueden aportar información valiosa acerca del funcionamiento de las bombas.

- Caracterización del funcionamiento de la bomba en función del nivel de dinámico de agua o DWL. Dado que en muchas es difícil estimar la profundidad mínima que se puede alcanzar en un pozo la evaluación de la resistencia de una bomba a un descenso en nivel de agua parece un dato de especial relevancia. El proceso de experimentación es sencillo ya que sólo habría que controlar el nivel de agua en el depósito.
- Estudio del esfuerzo humano aplicado a bombas manuales. En la bibliografía consultada se encuentra poca información acerca de la ergonomía de funcionamiento de las bombas. La determinación tanto de la idoneidad de una bomba para su uso por niños, mujeres u hombres como de los niveles de esfuerzo reales (fuerza vs velocidad de palada) que aplica un ser humano al bombeo manual parecen relevantes a la hora de juzgar las características de una bomba.
- Si finalmente la instalación lo permite se acondicionarán fondos de arena en el depósito y se evaluará el efecto que esto produce sobre la bomba y la calidad del agua.
- Con los datos recogidos en la experimentación con usuarios se realizarán cálculos estadísticos acerca del caudal respecto a la profundidad de acuerdo a las características del operador de la bomba.

## 5 Resultados Preliminares

Estos resultados no se pueden considerar como tal ya que aún no se han recibido las bombas manuales. De todas formas se quiere dejar constancia de los avances realizados y de la información recabada para ser empleada una vez se reciban los equipos.

### 5.1 *Evaluación de la Bomba Manual Afridev*

#### 5.1.1 Obtención

<b>Fabricante:</b>	Meera & Ceiko Pumps Pvt. Ltd.  4-3-161, 2153/5, Hill Street Ranigunj, Secunderabad, 500 003, A.P. INDIA Tel.:+ 91 40 27615131, 27617098, Fax: + 91 40 27614376 E-mail: <a href="mailto:hyd1_meera@sancharnet.in">hyd1_meera@sancharnet.in</a> Website: <a href="http://www.meera-ceiko.com">www.meera-ceiko.com</a>
<b>Modelo:</b>	Afridev  La bomba manual Afridev es una bomba de pistón, de pozo profundo. Su uso esta recomendado para profundidades entre 15m y 45m. Es una bomba de domino público.  La fabricación, operación y mantenimiento de esta bomba sigue los principios VLOM y goza de muy buena popularidad en las regiones ahí donde ha sido empleada  Los datos técnicos ya han sido recogidos en un capítulo anterior. Queda pendiente contrastar esta información con la enviada por el fabricante.
<b>Precio:</b>	\$177 con material para su instalación a 6m de profundidad sin considerar gastos de envío.

Como impresiones generales del proceso de obtención de la bomba manual Afridev se realizan los siguientes comentarios:

- La información disponible en páginas web de las distintas organizaciones internacionales, a excepción de la SKAT, suele estar anticuada y se encuentra escasa información útil acerca de fabricantes y/o suministradores.
- Se recomienda contactar con la RWSN o la SKAT para que le proporcione una lista de fabricantes cualificados así como información acerca de las configuraciones de la bomba que resultan más apropiadas y extendidas.
- Para más información acerca de selección y compra de bombas manuales se recomienda la lectura de “Technology Selection and Buyer’s Guide for Public Domain Handpumps for Drinking Water”, publicado por la SKAT, 2002.

### 5.1.2 Medidas y consideraciones previas

Como a la finalización del proyecto no se han recibido las bombas manuales no se puede realizar ninguna medida. Si se describe el proceso de control de calidad detallado por la SKAT en las especificaciones técnicas de la Afridev, que define unos pasos para que los fabricantes aseguren la calidad de sus productos, estos pasos se dividen en una inspección visual y dimensional de las piezas fabricadas y en un test de descarga. Estos pasos se pueden utilizar de guía completando los procedimientos de evaluación.

#### *Inspección visual y dimensional:*

- 100% de intercambiabilidad entre los distintos sub-montajes y componentes
- Se inspeccionaran todas las soldaduras, trabajos manuales, uniones, terminaciones y superficies
- Todas las dimensiones de los ensamblajes y subensamblajes serán comprobados de acuerdo al los planos de las especificaciones técnicas
- Se prestará especial atención a los siguientes puntos:

Carrera de la palanca (225 +/-6)

Diámetro interno y superficie del hogar del fulcro o punto de apoyo de la palanca, y del tronco del enganche de la varilla ( $\phi 47 +0,1/-0$ )

Longitud del tronco del enganche superior de la varilla (58 +0,2/-0) y del hogar del fulcro (109,5 +0,2/-0)

Diámetro exterior del forro del fulcro y del forro del enganche superior de la varilla (38 +0/-0,2)

Longitud del forro del enganche superior de la varilla (68,5 +0,2/-0) y del forro del fulcro (119,5 +0/-0,2)

Distancia entre las escuadras del fulcro (120,2 +0,5/-0)

Diámetro exterior de las tuberías de PVC de ascensión y succión

Diámetro interior de las uniones de PVC y la guía superior

Diámetro interior de las tuberías de PVC con los extremos limados

Todas las tuberías y accesorios deben tener limados los bordes en un ángulo de 15°

- El diámetro interno del forro de fricción debe ser comprobado después de situarlo dentro de la tubería
- Las guías del fulcro, del forro del fulcro, del enganche y forro superior de la varilla no deberán sobresalir después de ser ensambladas
- El ensamblaje de los elementos del fulcro y del enganche de la varilla no debe suponer la realización de esfuerzos o tensiones la aparición de tensiones.
- El enganche de la varilla deberá encajar fácilmente en las aberturas dispuestas en la cabeza de la palanca y el orificio de retención deberá estar alineado con los agujeros dispuestos en el cuerpo de la bomba para facilitar el montaje.
- Las conexiones de las varillas deben comprobarse
- Las varillas deben inspeccionarse para comprobar que encajan con las herramientas de montaje.
- Las siguientes comprobaciones se deben realizarse antes de ensamblar el pistón y en adición a las mediciones realizadas:

Diámetro exterior y longitud del forro de fricción

Perdidas en el pistón a 1bar y a 10bar de presión hidráulica

Enganche correcto entre la válvula de pie y la herramienta para retirarla

Test de tensión en una de las soldaduras de giro del ensamblaje del cuerpo de la válvula

- Si se estima necesario se desmontarán e inspeccionarán todos los componentes de la bomba

### ***Test de descarga:***

Se situará el cilindro ensamblado en un depósito habilitado al efecto. Se realizarán 40 paladas completas de la válvula de pie en un minuto, el volumen desalojado no debe ser inferior a 16,5 litros

Aparte de realizar todas estas medidas a la recepción de la bomba se realizará un análisis completo del grado de ensamblaje de la bomba. Después de el cual se desmantelará por completo la bomba manual realizándose un estudio completo de la misma de acuerdo a lo especificado en el punto de ingeniería.

## 5.2 Evaluación de la Bomba Manual Malda

### 5.2.1 Obtención

<b>Fabricante:</b>	Meera & Ceiko Pumps Pvt. Ltd.  4-3-161, 2153/5, Hill Street Ranigunj, Secunderabad, 500 003, A.P. INDIA Tel.:+ 91 40 27615131, 27617098, Fax: + 91 40 27614376 E-mail: <a href="mailto:hyd1_meera@sancharnet.in">hyd1_meera@sancharnet.in</a> Website: <a href="http://www.meera-ceiko.com">www.meera-ceiko.com</a>
<b>Modelo:</b>	Malda  La bomba manual Malda es una bomba de pistón, de acción directa. Su uso está recomendado para profundidades entre 5m y 12m, pudiendo llegar hasta los 15m. Es una bomba de domino público.  La fabricación, operación y mantenimiento de esta bomba sigue los principios VLOM y goza de muy buena popularidad en las regiones ahí donde ha sido empleada  Los datos técnicos ya han sido recogidos en un capítulo anterior. Queda pendiente contrastar esta información con la enviada por el fabricante.
<b>Precio:</b>	\$186 con material para su instalación a 6m de profundidad sin considerar gastos de envío.

Como impresiones generales del proceso de obtención de la bomba manual Malda se realizan los siguientes comentarios:

- Al ser una bomba manual de desarrollo relativamente reciente no se encuentra mucha información acerca de posibles fabricantes y/o distribuidores.
- Se recomienda contactar con la RWSN o la SKAT para que le proporcione una lista de fabricantes cualificados así como información acerca de las configuraciones de la bomba que resultan más apropiadas y extendidas.
- Para más información acerca de selección y compra de bombas manuales se recomienda la lectura de “Technology Selection and Buyer’s Guide for Public Domain Handpumps for Drinking Water”, publicado por la SKAT, 2002.

### 5.2.2 Medidas y consideraciones previas

Como a la finalización del proyecto no se han recibido las bombas manuales no se puede realizar ninguna medida. Si se describe el proceso de control de calidad detallado por la SKAT en las especificaciones técnicas de la Malda, que define unos pasos para que los fabricantes aseguren la calidad de sus productos; se dividen en una inspección visual y dimensional de las piezas fabricadas y en un test de descarga. Estos pasos se pueden utilizar de guía completando los procedimientos de evaluación.

#### *Inspección visual y dimensional:*

- 100% de intercambiabilidad entre los distintos sub-montajes y componentes
- Se inspeccionaran todas las soldaduras, trabajos manuales, uniones, terminaciones y superficies
- Todas las dimensiones de los ensamblajes y subensamblajes serán comprobadas de acuerdo al los planos de las especificaciones técnicas
- La guía de la varilla de acero inoxidable deberá tener libertad de movimiento sin tocar en ningún momento la barra o el anillo de parada
- Las uniones entre las tuberías de HDPE, accesorios HPDE y partes metálicas se deberá realizar fácilmente con la mano.
- Se comprobará que todas las tuberías de la varilla tienen limados los bordes en un ángulo de 30°, especialmente en los extremos para asegurar un fácil montaje y un correcto funcionamiento del conjunto.

#### *Test de descarga:*

- Una vez ensamblada la Malda se procederá a realizar la siguiente prueba. El experimento empezara en el momento en que comience a salir agua por el caño. Se almacenará el agua bombeada en 40 carreras completas del cilindro en un minuto, el volumen de agua recogido no debe ser inferior a 20 litros

Aparte de realizar todas estas medidas a la recepción de la bomba se realizará un análisis completo del grado de ensamblaje de la bomba. Después del cual se desmantelará por completo la bomba manual realizándose un estudio completo de la misma de acuerdo a lo especificado en el punto de ingeniería.

## 6 Conclusiones y Desarrollo Futuro del Informe

Este proyecto lejos de aportar conclusiones lo que pretende es continuar la labor realizada por Unai Tomillo en su PFC *“Estudio Acerca del Empleo de la Bomba Manual en el Ámbito Rural en Países en Vías de Desarrollo”*, y convertirse en el primero de una serie de trabajos que deberán culminar en la puesta en marcha de un banco de ensayos de bombas manuales en la Universidad Carlos III de Madrid.

Las bombas manuales abastecen de agua a más de una sexta parte de la población mundial, según estimaciones que probablemente han sido sobrepasadas. La bomba manual es una tecnología moderna y prueba de ello es que la practica totalidad de los modelos empleados actualmente han sido desarrollados en las últimas dos décadas y que no dejan de aplicarse mejoras y de adaptarse a nuevos entornos de funcionamiento. Por ello resulta de gran interés el desarrollo de un laboratorio que contenga un banco de ensayos de bombas manuales para docencia y desarrollo, más aun teniendo en cuenta que esta iniciativa es pionera en España, conociéndose sólo tres laboratorios de este tipo en el mundo: (SKAT, Suiza, Banco Mundial, Reino Unido, y ACH, Francia)

Dentro del complejo problema del abastecimiento de agua los distintos agentes de desarrollo han identificado a la bomba manual como una de las tecnologías más útiles para cubrir las necesidades básicas de agua de las comunidades más desfavorecidas.

Las principales aportaciones de este proyecto al futuro laboratorio son el diseño del banco de ensayos, y el establecimiento de un procedimiento de evaluación de bombas manuales. El diseño del banco de ensayos ha sido la principal de estas tareas y la que mayor número de horas ha reclamado. Este diseño se considera adecuado a las finalidades y usos de laboratorio, y queda pendiente de los imprevistos y modificaciones que siempre surgen en la tarea de llevar a la práctica lo diseñado sobre el papel. Cambios que por otra parte afectarán a los parámetros básicos de diseño establecidos

La otra aportación realizada es el desarrollo de un procedimiento de ensayo de bombas manuales. Éste, inspirado en el desarrollado por el Banco Mundial en su proyecto de evaluación de bombas manuales da una serie de directrices sobre la evaluación de bombas manuales, directrices que por otra parte deben ser y son flexibles, ya que cada modelo de bomba manual requerirá un método de trabajo único adaptado a las particularidades de diseño y funcionamiento de la misma.



Aunque a la finalización de este proyecto todavía no se han recibido, se espera que en un corto periodo de tiempo la Universidad Carlos III de Madrid cuente con dos bombas manuales, la Afridev y Malda, ambos modelos representativos de la evolución tecnológica de las bombas manuales en los últimos años y probablemente las dos únicas bombas VLOM presentes en España.

Son tres las líneas de desarrollo futuro del informe que se abren a la finalización de este proyecto.

- **Desarrollo tecnológico completo de una bomba de mecate:** Como se ha visto, el banco de ensayos deja un espacio habilitado para la instalación y operación de una bomba de mecate. Pero salvo la estimación de las dimensiones mínimas de la bomba de mecate para el dimensionado de la plataforma la labor esta totalmente por empezar y completar.
- **Trabajos preliminares a la recepción de la Afridev y la Malda** (Se espera que las bombas estén en Madrid a lo largo de Septiembre-Octubre). Una vez recibidos los equipos hay que proseguir con la evaluación de los mismos. La base del trabajo está definida en los puntos 2, 3 y 8 del procedimiento estándar de evaluación de bombas manuales.
- **Finalización de la instrumentación:** Durante el diseño del banco se han dejado pendientes varias tareas por falta de medios para completarlas. Estas son la calibración y elección del sistema de medición del esfuerzo con galgas extensiométricas y la selección de un motor hidráulico apropiado para accionar de manera automática y controlada la bomba Afridev.

Respecto a la medición de esfuerzo la calibración de las galgas requiere el ensamblaje de varios de los componentes de la bomba y la realización de un proceso de ensayos determinado. Este trabajo se puede realizar de manera sencilla una vez finalizado el banco de ensayos, de manera previa a la puesta en marcha de la instalación.

Con el motor hidráulico la situación es más sencilla ya que los parámetros de funcionamiento ya están definidos y solamente hay que seleccionar un equipo que se ajuste a las demandas de la bomba. Será importante antes de realizar esta tarea conocer la disponibilidad de espacio existente sobre la plataforma

- **Estudio y desarrollo de los protocolos de trabajo con bombas manuales:** Es necesario que conforme se acerque la fecha de puesta en marcha se vayan definiendo protocolos de trabajo, ensayo y docencia. Esta labor contará con la base propuesta de evaluación de bombas manuales junto a todos aquellos aspectos originales o no que se quieran añadir al funcionamiento del laboratorio.

Por otro lado como tareas complementarias a la puesta en marcha del laboratorio se recomiendan dos actividades que pueden mejorar la calidad de los trabajos realizados.

- Estudio tecnológico de la bomba manual.
- Constitución de un fondo bibliográfico sobre tecnologías apropiadas al desarrollo y, en especial sobre bombas manuales

El estudio tecnológico de la bomba manual tendría como objeto la definición de las premisas de diseño y funcionamiento de la bomba manual de cualquier tecnología analizando críticamente las virtudes y defectos de cada solución adoptada. De esta forma resultará más fácil cuantificar y medir los resultados obtenidos en el banco de ensayos.

Por último es notable la ausencia de referencias bibliográficas en el conjunto de bibliotecas españolas en lo referente a la bomba manual en particular y a las tecnologías apropiadas en general. Sería bueno que, aprovechando el marco del laboratorio, se formase un fondo bibliográfico de fácil acceso para que investigadores, alumnos, profesores y personas interesadas puedan acceder a los distintos textos relacionados con el tema.

## **7 Bibliografía**

- Ahrtag (1995). Ahrtag resource list: information for health on diarrhoeal diseases: an international listing of sources of resource materials and organisations.
- Arlosoroff, S., Tschannerl, G., Grey, D., Journey, W., Karp, A., Langenegger, O. and Roche, R. (1987) Community Water Supply: The Handpump Option. The World Bank: Washington D.C.
- Arroyo, J., Aznar, A., Chinchilla, M., Martín-Loeches, M., Martínez-Legazpi, P., Ruiz-Rivas, U. (2006). Diseño de un Laboratorio de Tecnologías Apropriadas para el Abastecimiento de Agua. Ponencia III Congreso Universidad y Cooperación al Desarrollo. Universidad Complutense de Madrid.
- Banco Mundial/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Interregional. Rural Water Supply Handpumps Project (1985). Handpump Testing and Development: Proceedings of a Workshop in China. Washington, D.C.: Banco Mundial
- Banco Mundial/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Interregional. Project for Laboratory and Field Testing and Technological Development of Rural Water Supply Handpumps. (1986). Draft sample bidding documents for the procurement of handpumps. Washington, D.C.: Banco Mundial.
- Baumann E. (2000). Water lifting. Published by: SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management.
- Baumann, Erich and Keen. (2002). "Afridev Handpump Specification, Revision 4 - 2002." SwissCentre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT). St.Gallen, Switzerland.
- Cejalvo Lapeña, Antonio. NTP 342: Válvulas de seguridad (I): Características técnicas. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo.
- Consumers' Association Testing & Research Laboratories (1983). Laboratory Evaluation of hand-Operated Water Pumps for Use in Developing Countries. World Bank Technical paper No. 6. Washington, D.C.: World Bank.

- Consumers' Association Testing and Research Laboratories. (1984). Laboratory testing of handpumps for developing countries: Final Summary Report. World Bank Technical Paper no. 6 . Washington, D.C.: Banco Mundial
- Consumers' Association Testing and Research Laboratories. (1985). Laboratory testing of handpumps for developing countries: Final Technical Report. World Bank Technical paper no. 19 . Washington, D.C.: Banco Mundial
- Erpf, Karl. (2002). Technology Selection and Buyer's Guide for Public Domain Handpumps for Drinking Water. SKAT – HTN Publication
- Erpf, Karl. (2003). Installation and Maintenance Manual for the Afridev Handpump SKAT - HTN Publication.
- Erpf, Karl. (2004). India Mark Handpump Specifications, Revision 1 – 2004. SKAT - HTN Publication.
- Erpf, Karl. (2005). MALDA Direct Action Handpump Specifications, Revision 2 - 2005. SKAT – HTN Publication
- Erpf, Karl. (2005). RWSN-SKAT. The Rope Pump Concept.
- Erpf, Karl; Randrianasolo, Alexis. (2004). Madagascar Rope Pump Specification, First Edition 0-2004. SKAT – HTN Publication
- Garnet (1995). Handpump Technology Network
- Gleick P H, (1996). Basic water requirements for human activities: meeting basic needs, Water International, 83-92.
- Goh, Sing Yau. (1985) "Laboratory and Field Testing of Hand-pumps." IDRC-TS51e. Ottawa: International Development Research Centre.
- Martín-Loeches M. (2005). Tecnologías apropiadas de captación y elevación de agua en contextos de desarrollo. Departamento de geología de la universidad de Alcalá.
- Nampusuor R. (2000). Report on The Performance of Afridev and Nira Handpumps on the Upper regions Community Water Project (COWAP) Ghana Report for the GWSC/CIDA Upper regions, Ghana.
- Postel, S. (1999). Last Oasis: Facing Water Scarcity. New York, W.W. Norton and Company.
- Prakash, G. (1995). Guidelines for Quality Control and Quality Assurance of Afridev Handpump. St. Gallen, Switzerland: Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management.
- Reynolds, J. (1992). 'Handpumps: Toward a Sustainable Technology', UNDP World bank Water and Sanitation Program.

- Skat Foundation (2002). Public Domain Handpumps for Drinking Water. SKAT – HTN Publication
- Skinner, Brian and Shaw, Rod (2002) VLOM pumps. WEDC Loughborough University Leicestershire.
- Tomillo Gutiérrez, Unai. (2006). Estudio acerca del empleo de la Bomba Manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo. PFC Universidad Carlos III de Madrid.
- Turmo Sierra, Emilio. NTP 510: Válvulas de seguridad: Selección. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo.
- UNICEF. Manual sobre el agua (1999).
- Van Beers, P. (2001) 'Leasing, a new Handpump O&M concept', in Scott, R. (ed.) proceedings of 27th WEDC Conference, Lusaka, Zambia, August 2001. WEDC, Loughborough University: UK.
- Vammalan Konepaja. Nira Handpumps. Africa Edition.
- Whitehead, Vince (2001). Development and Selection of Low Cost Handpumps for Domestic Rainwater Tanks in E. Africa. University of Warwick